



TITLE:

水生雑草ホテイアオイの環境要因  
に対する生育反応及び繁殖力に関  
する研究( Dissertation\_全文 )

AUTHOR(S):

沖, 陽子

---

CITATION:

沖, 陽子. 水生雑草ホテイアオイの環境要因に対する生育反応及び繁殖  
力に関する研究. 京都大学, 1982, 農学博士

ISSUE DATE:

1982-11-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r4826>

RIGHT:

|      |
|------|
| 新 制  |
| 農    |
| 358  |
| 京大附図 |

# 水生雑草ホテイアオイの環境要因に対する 生育反応及び繁殖力に関する研究

沖 陽 子

1 9 8 2

水生雑草ホテイアオイの環境要因に対する  
生育反応及び繁殖力に関する研究

沖 陽 子

1 9 8 2

# 目 次

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 緒 論 .....                          | 1  |
| 第 1 章 水中の栄養塩と生育及び繁殖との関係 .....      | 5  |
| 第 1 節 要素欠除の影響 .....                | 5  |
| 1. 実験材料及び方法 .....                  | 5  |
| 2. 実験結果及び考察 .....                  | 6  |
| 第 2 節 窒素が生育・繁殖に及ぼす影響 .....         | 9  |
| 1. 窒素濃度の影響 .....                   | 12 |
| (1) 実験材料及び方法 .....                 | 12 |
| (2) 実験結果及び考察 .....                 | 12 |
| 2. PH の影響 .....                    | 15 |
| (1) 実験材料及び方法 .....                 | 15 |
| (2) 実験結果及び考察 .....                 | 15 |
| 3. 窒素形態の影響 .....                   | 21 |
| (1) 実験材料及び方法 .....                 | 21 |
| (2) 実験結果及び考察 .....                 | 21 |
| 第 3 節 リン並びにカルシウムが生育・繁殖に及ぼす影響 ..... | 30 |
| 1. リン濃度の影響 .....                   | 30 |
| (1) 実験材料及び方法 .....                 | 30 |
| (2) 実験結果及び考察 .....                 | 30 |
| 2. カルシウム濃度の影響 .....                | 32 |
| (1) 実験材料及び方法 .....                 | 32 |
| (2) 実験結果及び考察 .....                 | 32 |
| 第 4 節 摘 要 .....                    | 36 |



|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第2章 温度と生育及び繁殖との関係 .....        | 38 |
| 第1節 実生株の生育特性 .....             | 38 |
| 1. 発芽及び初期生育期の場合 .....          | 38 |
| (1) 実験材料及び方法 .....             | 38 |
| (2) 実験結果及び考察 .....             | 39 |
| 2. 栄養及び生殖生長期の場合 .....          | 45 |
| (1) 実験材料及び方法 .....             | 45 |
| (2) 実験結果及び考察 .....             | 45 |
| 第2節 成株の生育特性 .....              | 50 |
| 1. 実験材料及び方法 .....              | 50 |
| 2. 実験結果及び考察 .....              | 51 |
| 第3節 低温に対する生育反応 .....           | 59 |
| 1. 発生分布域と気温との関連性 .....         | 59 |
| (1) 調査方法 .....                 | 59 |
| (2) 調査結果及び考察 .....             | 59 |
| 2. 自然状態における耐寒性 .....           | 59 |
| (1) 実験材料及び方法 .....             | 59 |
| (2) 実験結果及び考察 .....             | 63 |
| i) 大阪府南河内郡寺池調査 .....           | 63 |
| ii) 岡山大学農業生物研究所構内 .....        | 66 |
| 3. 結氷回数と再生との関係 .....           | 68 |
| (1) 実験材料及び方法 .....             | 68 |
| (2) 実験結果及び考察 .....             | 69 |
| 第4節 摘    要 .....               | 74 |
| 第3章 自然水域における生産量及び群落構造の解析 ..... | 75 |
| 第1節 個体群の生長と群落構造の動態 .....       | 75 |
| 1. 実験材料及び方法 .....              | 75 |
| 2. 実験結果及び考察 .....              | 76 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| (1) 調査地点の水質変動 .....          | 76  |
| (2) 最大増殖力 .....              | 78  |
| (3) 個体数の動態 .....             | 81  |
| (4) 個体群の伸長生長 .....           | 85  |
| (5) 現存量の変動 .....             | 90  |
| (6) 植物体内の窒素及びリン含有量 .....     | 97  |
| 第2節 水系別生産量と窒素及びリン吸収能 .....   | 102 |
| 1. 実験材料及び方法 .....            | 102 |
| 2. 実験結果及び考察 .....            | 103 |
| (1) 調査地の水質特性 .....           | 103 |
| (2) 個体数の動態 .....             | 106 |
| (3) 現存量の変化 .....             | 110 |
| (4) 植物体内の窒素及びリン含有量と蓄積量 ..... | 112 |
| 第3節 摘 要 .....                | 117 |
| 第4章 種々の生息地における適応力 .....      | 118 |
| 第1節 種々の育成状態における生育特性 .....    | 118 |
| 1. 夏期の生育特性 .....             | 118 |
| (1) 実験材料及び方法 .....           | 118 |
| (2) 実験結果及び考察 .....           | 119 |
| 2. 冬期の生育特性 .....             | 123 |
| (1) 実験材料及び方法 .....           | 123 |
| (2) 実験結果及び考察 .....           | 123 |
| 3. 乾燥に対する抵抗性 .....           | 126 |
| (1) 実験材料及び方法 .....           | 126 |
| (2) 実験結果及び考察 .....           | 126 |
| 第2節 種々の育成状態における組織学的研究 .....  | 128 |
| 1. 実験材料及び方法 .....            | 128 |
| 2. 実験結果及び考察 .....            | 129 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| (1) 根の構造 .....            | 129 |
| (2) 葉身部及び葉柄部の構造 .....     | 132 |
| (3) 気孔の分布 .....           | 133 |
| 第3節 種々の育成状態における種子繁殖 ..... | 138 |
| 1. 開花結実特性 .....           | 138 |
| (1) 実験材料及び方法 .....        | 138 |
| (2) 実験結果及び考察 .....        | 138 |
| 2. 花粉発芽特性 .....           | 143 |
| (1) 実験材料及び方法 .....        | 143 |
| (2) 実験結果及び考察 .....        | 143 |
| 3. 種子の発芽特性 .....          | 144 |
| (1) 実験材料及び方法 .....        | 144 |
| (2) 実験結果及び考察 .....        | 145 |
| i) 温度が発芽に及ぼす影響 .....      | 145 |
| ii) 刺傷処理 .....            | 146 |
| iii) 酸・アルカリ及び各種薬品処理 ..... | 146 |
| iv) 0℃凍結が発芽に及ぼす影響 .....   | 147 |
| v) 各種貯蔵条件が発芽に及ぼす影響 .....  | 149 |
| 第4節 摘    要 .....          | 154 |
| 第5章 総 合 考 察 .....         | 156 |
| 総    括 .....              | 162 |
| 引 用 文 献 .....             | 167 |
| Summary .....             | 177 |

人類が地球上に生存する限り水の利用は永遠に続くものであり、また、不可避なことである。過去においては、種々の水系に生息する水生植物は、生態系の中に組み込まれたものとして見過ごされてきた。そして、特に人類とのかかわりあいについてとりあげられることも無かった。<sup>35)</sup>ところが最近、水生植物の中で水生雑草として恐れられている種がアメリカ、ヨーロッパ、オセアニアなど各国で150種にもものぼっており、その中でも、約40種が重大な問題を投げかけている。<sup>144)</sup>過去20年間に報告された水生雑草の防除や利用に関する文献は、おびただしいものである。<sup>144)</sup>では、なぜこのように水生雑草が全世界で大きく注目されるようになったのであろうか。まず、水の富栄養化が急速に促進されたこと、それに伴って、旺盛な繁殖力を有する種が存在したこと、そして防除する場合、対象となる水系の用途の多面性から安易に化学的防除が行えず、防除の体系化が困難であったことに起因するであろう。特に富栄養化は全世界共通の深刻な問題となっている。また、温帯地域などで自然条件下では冬期に枯死する雑草が温排水の流入で越冬が可能となり翌春に再生し、大繁茂を引き起こす現象も見逃せない。

環境白書によると、最近の我が国の水質汚濁状況は総体的に改善されているという。しかし、中小河川や閉鎖系の湖沼では家庭排水や工場排水が流入し、いまだ富栄養化の状態が継続している。最近、琵琶湖の富栄養化の防止に関する条例が公布、施行されたのは周知の如くである。この水系の富栄養化が、今日、水界の生物相に異変を与え、水生雑草繁茂の引き金となったことは自明である。

ところで、この防除困難な水生雑草のひとつに、世界の10大害草に数えられるホテイアオイ (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) が挙げられる。南米原産のミズアオイ科の多年草で主にストロンによる無性繁殖で分布地を拡大する。同属のものが他に5種存在する。*E. azurea*, *E. paniculata*, *E. paradoxa*, *E. natans*, *E. diversifolia* であるが、ホテイアオイのみが原産地より離れて北

緯 40°から南緯 45°までの熱帯、亜熱帯、温帯に広く分布した。アジアやアフリカの植民地の一部には約60年ほど前から存在しており、<sup>54)</sup> 既に1924年には、スリランカで害草とされている。<sup>38)</sup> それ以後、コンゴ共和国・スーダン・エジプトなどのアフリカ諸国、インド・パキスタン・インドネシア・インドシナ半島などの熱帯諸国で大繁茂するに至った。<sup>64)</sup> また、アメリカでは、1884年にルイジアナとフロリダに導入されたものが、<sup>102)</sup> 南部地域に蔓延し、現在はテキサス・ミシシッピ・アラバマ・ジョージア・カリフォルニアまで分布が拡大している。<sup>143)</sup> 他に異常繁殖が報告されている国は、オーストラリア・ニュージーランド・南米・中米、そして日本である。この植物は、薄紫色の華麗な花を咲かせるので、最初は観賞用植物として導入されるのであるが、のちに人為的に水系に捨てられることにより雑草化する。

本草が引き起こす実害は種々あるが、後述するとして、これらの害に対処すべき防除手段は、機械的、化学的、生物的に大きく分けられる。機械的防除は現在広く使用される手段だが経費が高く、化学的防除は安全性の点で使用範囲が限定される。1975年及び1979年のホテイアオイに関する研究内容をWeed Abstracts から拾って分類すると、両年共、防除に関する研究が半数に達しており、しかも近年増加をみせている。しかし、1975年には化学的防除と生物的防除が同程度に研究されていたのが、1979年では圧倒的に生物的防除に集中している。これは、化学的防除に対する抵抗感や、根絶より生態系の中での調節という考え方が優位になった為と考えられる。しかしながら、過度の生物導入はやはり生態系を乱し、防除効果も期待されるほど高くなく、この傾向も問題点が多い。一方、積極的に本草を利用する研究が俄かに増加しているが、この点に関しては章を改めて検討する。

ところで、我が国では本草は観賞用として明治中期に渡来し、西南暖地で雑草化した。<sup>40)</sup> ところが、約10年ほど前から水系の富栄養化と管理不足等で西南暖地にとどまらず、各地で旺盛な繁殖が問題視され公害雑草として注目されるようになった。

従って、日本各地の本草発生分布を把握する必要から、各都道府県農業試験場を通して調査したところ、太平洋側では栃木県を除く関東地方まで、日本海

側では新潟県を除く北陸地方まで発生が確認された。北海道、東北及び中部地方には発生が認められなかったが、これらの地域では夏期生育が可能であっても越冬が不可能なため分布できないと推測される。<sup>152)</sup> しかし、最近、福島県や長野県で発生が認められており、このことから温排水の流入や湧水などで冬期も比較的水温が高く、越冬可能な場が全国各地に偏在していると考えられる。<sup>96)</sup>

発生水系は、池及び灌漑用水路が多い。これは、流速が小さく、濁度の高い生息地を好むことに起因している。また、上記の水系は水田地帯あるいは下水処理施設が完備されていない新興住宅地に位置している傾向があり、異常繁殖が認められる付近には、養豚及び養鶏場が存在していたり、家庭污水がそのまま流れ込んでいる現況が報告されている。従って、富栄養化との関連性が非常に高いと推察される。

また、発生を認める大部分の都道府県で実害が報告されており下記の具体例があげられている。

- 1) 灌漑用水路、排水路等で水の流れを堰きとめる。
- 2) 舟の運行及び漁に影響を及ぼす。
- 3) 汚臭、悪臭の根源となる。
- 4) 冬期の植物体の腐敗により水質汚濁を引き起こす。
- 5) 美観阻害

現在、繁茂地では毎年、水系にオイルフェンスを張って本草の移動を防ぐと共に、舟やクレーンカーで機械的除去を行っているが多大の労力と費用を要し対策に苦慮している。また、我が国においても有害草から有用草への発想転換の兆しが現われ始めており、今後本草の管理体系を確立する上で、旺盛な生育及び繁殖力のメカニズムを解明することが重要な鍵と考えられる。本草は生物学的な観点から非常に興味ある現象を示すので単なる研究材料としての歴史は長い、陸上植物と比較して水生植物の領域はいまだ未開拓な分野であるので、初歩的な研究しか行われていない。また、水生雑草としてのアプローチからの研究は大部分が除草剤等を中心とした防除の面に片寄り、生理生態的特性を追求する基礎研究が遅れている。

本研究は以上のような観点から、我が国では、まだ歴史の浅い水生雑草の管

理体系を確立する代表例としてホテイアオイを取り上げ、特に生理生態的側面に主眼をおいて検討した。まず、富栄養化との関連性を追求する為に水中の栄養塩と旺盛な繁殖力との関係を明らかにした。次に、熱帯原産の本草が温帯の日本で定着可能であった理由として温度要因が考えられるので、温度に対する生育反応を把握した。一方、温帯の自然水域における長期に渡る生産量調査や群落構造の解析に関する報告が皆無であった為、その調査に着手し、本草の個体群の生長を明確にすることにより、管理体系への示唆を得た。また、本草が繁茂する大きな要因として、不良環境を含めて種々の生息地に速やかに適応する能力を有していることに着眼して、その場合の生育特性と種子繁殖の可能性を得た。そして、これらの実験結果に基づいて管理体系の確立を試みた。まだ研究を要すべき点もあるが、ここに研究成果をとりまとめて報告する次第である。

本研究の実施及び論文を作成するにあたり、終始御懇篤な御指導と御校閲を賜った京都大学教授植木邦和博士に深甚なる感謝の意を表す。また、本研究を遂行するにあたり岡山大学農業生物研究所教授中川恭二郎博士には終始御指導と御激励を賜り、心からお礼を申し上げる。

本研究を実施するにあたり、京都大学助教授伊藤操子博士、岡山大学農業生物研究所助教授青山勲博士並びに同所助手村本茂樹氏には終始かわらぬ御指導を戴き感謝の意を表す。さらに、本論文とりまとめに際し、適切なる御助言と温情ある御激励を戴いた神戸大学教授松中昭一博士並びに岡山大学農業生物研究所元教授森井ふじ博士に感謝の念を捧げる。

岡山大学農業生物研究所技官西崎日佐夫氏、同技官野木真理子氏には実験の遂行並びに図表の作成に当たり多くの労を煩わした。また、京都大学講師山末裕二博士、同助手小林央往博士をはじめ同雑草学研究室諸氏には多くの御協力を得た。ここに衷心から御礼を申し上げる。



## 第1章 水中の栄養塩と生育及び繁殖との関係

浮遊性植物であるホテイアオイは、水中の栄養塩を直接に吸収して、旺盛な生育及び繁殖を行う。緒論で、水系の富栄養化が水生雑草繁茂の引き金となったと述べたが、確かに富栄養化の進んだ水を使用して、本草の生育調査を行った報告は枚挙にいとまない。<sup>105)</sup> 第三次処理の污水浄化用としての利用面から着目したもので、本草が190ppmの高濃度のアンモニア態窒素中でも生育可能であることが明らかにされている。<sup>116)</sup> しかし、富栄養化の元凶である窒素とリンに関して、植物学的な立場から追求した実験例は少ない。<sup>39, 77)</sup>

一方、植物体の代謝に大きく関与するpHについても、繁茂地のpH値が測定されている<sup>13, 80, 102)</sup>にすぎず、本草の生育における最適pH値、あるいは生育抑制を受ける範囲も明らかにされていない。

従って、本章は、まず、要素欠除実験より生育及び繁殖に影響を与える栄養塩を模索し、その各々の栄養塩に関して、水耕栽培による詳細な検討を試みた。

### 第1節 要素欠除の影響

植物の生育に必須であるところの、植物必須元素のいずれか一つが欠けると、植物はそれぞれの場合に特有の欠乏症状を呈する。<sup>60)</sup> すなわち、正常な生育が抑制されることになる。この現象に留意して、ホテイアオイの生理的な弱点を把握する事が、旺盛な繁殖力に対処する上で非常に重要なことと考えられるので、要素欠除を施した水耕栽培により、ホテイアオイの生育に大きく影響を及ぼす要素を検討した。10種類の必須元素から窒素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウム及び鉄を選んで行った。

#### 1. 実験材料及び方法

約4ヶ月間水槽中で育成した葉数5～6枚の成株を使用し、子株及びその原基は切除した。根は約10cmに切り揃え、根量もほぼ一定にして、実験開始前に無肥で7日間育成した。実験は12月8日から1月8日まで、ファイトロン(25℃～30℃、全日長)の条件下で行った。窒素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウム及び鉄の各要素を欠除させた区と、対照区としてすべての

Table 1. Composition of culture solution.

| Source   | Concentration | Element                 |      |
|--|---------------|-------------------------|------|
|  | mg/l          |                         | mg/l |
| $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ | 63.1          | $\text{P}_2\text{O}_5$  | 12.5 |
| KCl  | 39.9          | $\text{K}_2\text{O}$    | 25.2 |
| $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$            | 123.0         | MgO                     | 20.0 |
| $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$            | 57.7          | CaO                     | 22.2 |
| EDTA-Na-Fe salt                                      | 20.6          | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 4.3  |

要素を含んだ完全区とを設け 15 ℓ 入りのポリエチレン容器に Table 1 に示す培養液を 10 ℓ 入れた。なお、窒素源には、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  を使用し、アンモニア態で 20 ppm とした。各区 2 反復で、各ポット 1 株ずつとした。培養原液の希釈には蒸留水を用い、12 月 13 日、18 日、27 日の 3 回液更新を行った。実験終了後、親株・子株別にかつ茎葉部・根部別に新鮮重を測定し、1 昼夜 80℃ で乾燥後、乾物重を測定し、その後、小型粉砕機で粉砕して子株茎葉部のみ分析試料とした。茎葉部内の窒素はガンニング変法<sup>118)</sup> リンはバナドモリブデン酸アンモニウム法、<sup>118)</sup> カリウム・カルシウム・マグネシウム及び鉄は原子吸光分光分析法<sup>118)</sup> により分析した。

## 2. 実験結果及び考察

### (1) 生育状況

各主要要素欠除の影響を新鮮重、正常葉数、子株形成の調査にて検討した。その結果を Fig. 1 及び Fig. 2 に示したが、それによると -N 区は、クロロシスの徴候は無かったが、やや植物体全体が軟弱で根の伸長が他の区と比較して著しく促進され、根量も多く、青紫色を呈した。その結果、Table 2 に示したように -N 区の T-R 率は非常に低くなった。この現象は、稲の場合でも認められている。<sup>140)</sup> 一方、-P 区においては、新しく形成された葉にクロロシスが認められ、生育程度は -N 区より劣った。もともと含リン化合物は、生物体中でエネルギー伝達的手段として利用される為に、リンの供給が不足すると、植物体におこる合成反応の大部分に障害をうけ、<sup>129)</sup> 軟弱な外観を呈したと考えられる。

ところで、-K区では、一般に葉の形成の衰え白化などの病徴が、-Mg区ではマグネシウムがクロフィル形成に用いられることから、顕著なクロロシス徴候がみられるのであるが、ホテアオイの場合は、まったくそのような傾向が認められず、完全培養液の場合と同様、生育良好であった。ホテアオイはカリウム貯蔵量が比較的多いことから1ヶ月間供給されなくとも、生育に影響を及ぼすことが無かったと考えられるが、これは推測の域を出ない。次に-Ca区は、全処理区中、最も生育障害が著しく、特に新葉の形成が悪く異形葉が目立った。根の発育も極めて悪く、白色の新根は認められなかった。これより、ホテアオイはカルシウムの欠乏に対して敏感であることが明らかになった。

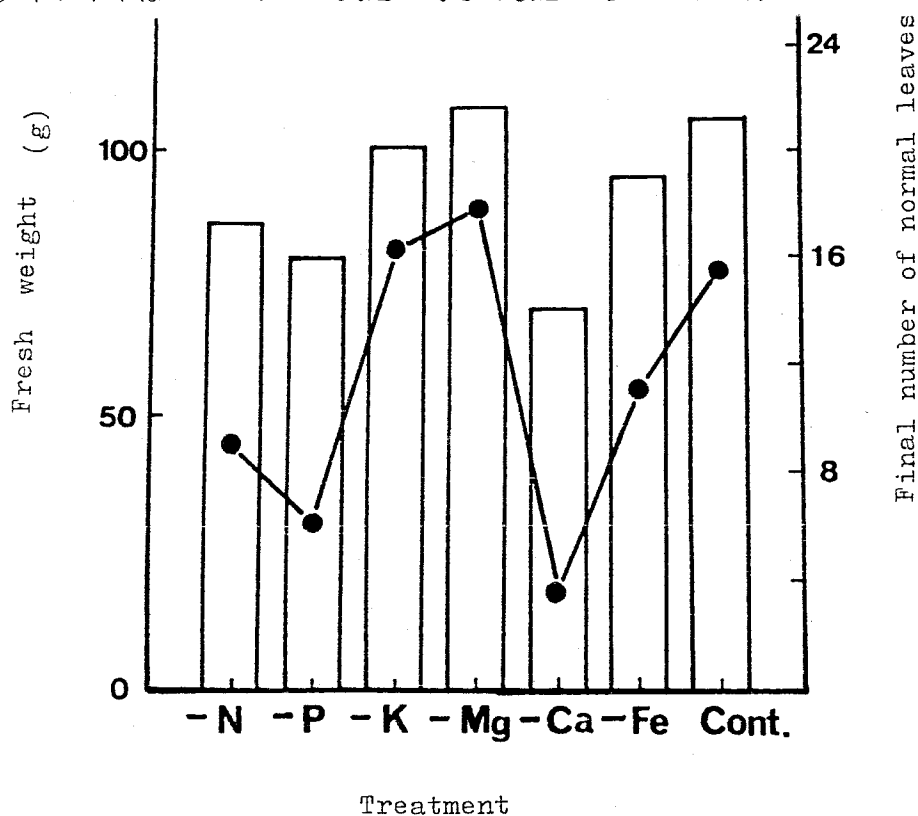


Figure 1. Effect of mineral deficiency in nutrient solution on fresh weight and the number of normal leaves.

Note: ●—● Final number of normal leaves

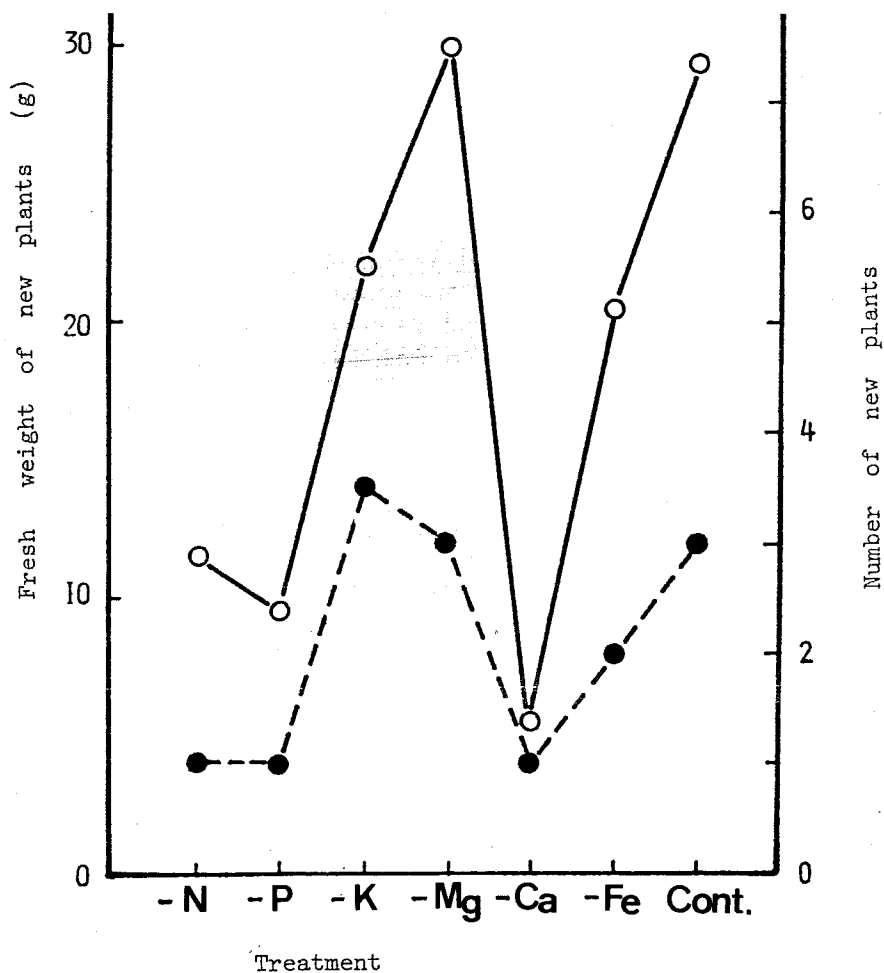


Figure 2. Effect of mineral deficiency in nutrient solution on the number of new plants.

Notes: ○—○ Fresh weight of new plants.  
●---● Number of new plants.

また、-Fe区は最初一週間ほど成葉にクロロシスが認められたが、その後、正常葉に戻り、新葉のみやや黄色味を帯びた。生育そのものは、さほど強く阻害されなかった。

## (2) 茎葉部の無機成分含量

培養液の要素欠除が茎葉部の窒素含有率に及ぼす影響をFig. 3に示したが、親株と子株では-Mg区、-Fe区以外はほぼ同様の傾向を示した。-K区にて、窒素含有率が最も高いが、稲の場合も同様の傾向が認められ、窒素代謝および

Table 2. Dry matter weight, T-R ratio and mineral content of tops of waterhyacinth plants grown in nutrient solution with mineral deficiency.

| Treatment | Dry matter weight |           | T-R ratio | N content of tops |           | Mineral content of tops of new plants<br>( on dry matter basis ) |      |      |      |           |
|-----------|-------------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|--|------|------|------|-----------|
|           | Total             | New plant |           | Mother plant      | New plant | P  | K    | Ca   | Mg   | Fe        |
| -N        | 4.93              | 0.67(9)   | 1.37      | 1.79              | 2.80 (%)  | 0.99   | 7.50 | 1.15 | 1.05 | 0.068 (%) |
| -P        | 4.07              | 0.62      | 2.11      | 4.67              | 5.66      | 0.34   | 4.80 | 0.95 | 0.85 | 0.066     |
| -K        | 4.51              | 1.39      | 2.25      | 5.56              | 6.85      | 1.57   | 3.80 | 0.90 | 1.05 | 0.061     |
| -Ca       | 3.52              | 0.40      | 2.23      | 5.11              | 6.27      | 1.09   | 5.55 | 0.25 | 1.45 | 0.085     |
| -Mg       | 6.01              | 1.62      | 2.72      | 4.55              | 6.54      | 1.42   | 8.05 | 1.05 | 0.30 | 0.047     |
| -Fe       | 5.13              | 1.05      | 2.54      | 4.64              | 5.36      | 1.11   | 7.80 | 0.70 | 0.90 | 0.029     |
| Cont.     | 4.75              | 1.49      | 2.36      | 4.87              | 6.16      | 1.34   | 6.85 | 0.80 | 0.85 | 0.087     |

炭水化物代謝が著しく異常になっている為といわれている。<sup>140)</sup>しかしながら、-N区を除いて他の区における窒素含有率の差はさほど顕著でなかった。また、その他の無機成分含有率について子株のみであるがFig. 4 に示した。生育が著しく阻害された3つの区について検討すると、共通して、リン含有率が比較的低いことが注目された。一方、窒素とリンが各欠除区共、同じ傾向の含有率を示したのに対して、カリウム、カルシウム及びマグネシウムが類似の傾向を示した。これらの資料のみでは、生育阻害をひき起こす要素が体内でどのように代謝活動を乱しているのか理解できないので、今後、さらに検討を要する。

## 第2節 窒素が生育・繁殖に及ぼす影響

第1節より窒素・リン・カルシウムがホテイアオイの生育や繁殖に著しく関与することが明らかになった。この中で、特に窒素については、本草の吸収力が高いことが知られており、また、水の富栄養化を招く問題の要素であるので、詳細な研究の必要性を認めた。まず、種々のアンモニア態窒素濃度及びpH下

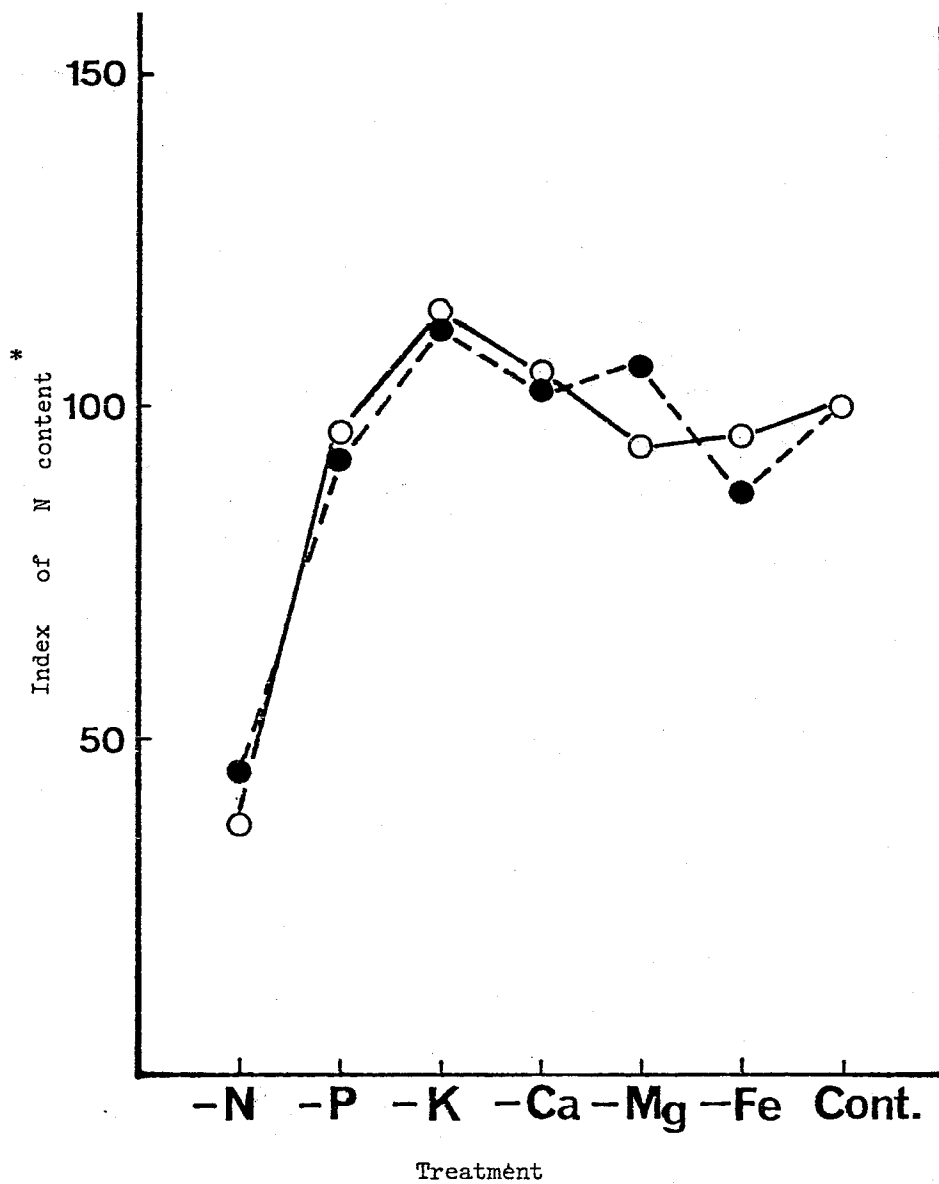


Figure 3. Effect of mineral deficiency in nutrient solution on nitrogen content of tops of plants.

Notes: ○—○ Mother plant.

●---● New plants.

\* Fresh weight of plants grown in the pH 7 solution = 100.

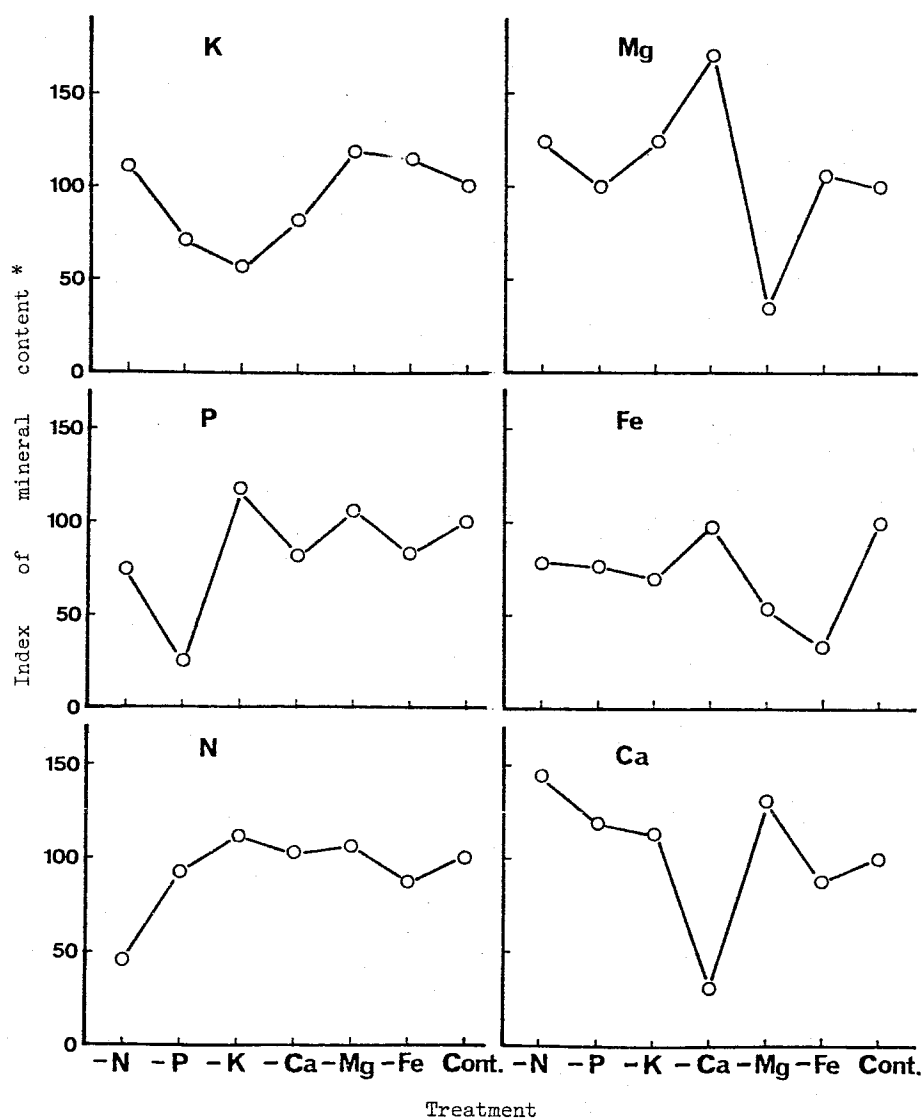


Figure 4. Effect of mineral deficiency in nutrient solution on mineral content of tops of new plants.

Notes: \* Mineral content of plants grown in the control solution = 100.



で生育反応を調査した。次に、本草は硝酸態窒素を好むとの報告もあり、<sup>79)</sup> また、両形態の差異が生育に及ぼす影響はpHなどの外的条件により左右されることから<sup>25, 70, 133, 134)</sup>種々のpHの下で、両形態の窒素源の有効度を比較検討した。

## 1. 窒素濃度の影響

### (1) 実験材料及び方法

供試個体は、葉数5～6枚、新鮮重70g前後の成株と葉数3～4枚、新鮮重10g前後の親株から切り離した幼株を使用した。根は約10cmに切り揃え根量も一定にし、実験開始前、真水で5日間育成した。実験は10月8日から25日間、ガラス室内で行った。室温は、13.2℃～37.2℃、水温は17.6℃～24.8℃であった。培養液は、アンモニア態窒素として $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ を用い、窒素濃度を0, 10, 20, 40, 80, 160 ppmの各段階に調整した。その他の成分については、Table1に示した通りである。培養原液は、水道水で希釈し、pH7に調節した。ポリエチレン容器に培養液を各10ℓ入れ、それぞれにホテイアオイ1個体を入れた。なお、液の更新は4～5日おきとした。また、対照として、豚尿尿の希釈液の区(Org.区)を設けた。同液は総窒素含量が6.4 ppm、アンモニア態窒素としては、1.1 ppm含まれている。これは、ホテイアオイ発生水域数カ所のほぼ平均的な値である。実験終了後、親株・子株別に、かつ茎葉部・根部別に新鮮重と乾物重を測定し、親株の茎葉部のみ窒素含量をケルダール法により分析した。

### (2) 実験結果及び考察

#### i) 生育状況

生育量を実験終了時の総新鮮重でみると、Fig. 5に示した通りとなった。すなわち、成株では20ppm以上のいずれの処理濃度でも生育良好で、160ppmでも生育抑制が認められず、根部も常に白色の新根が旺盛であった。また、幼株では40ppmの生育量が最大で、それ以上の濃度では漸次、減少した。特に160ppmでは根部における生育抑制が大きかった。一方、子株形成量については、Fig. 6に示したが、成株・幼株共、40ppmで子株形成数および子株の総新鮮重が最高となった。これは、幼株の総新鮮重の場合と同じ傾向である。

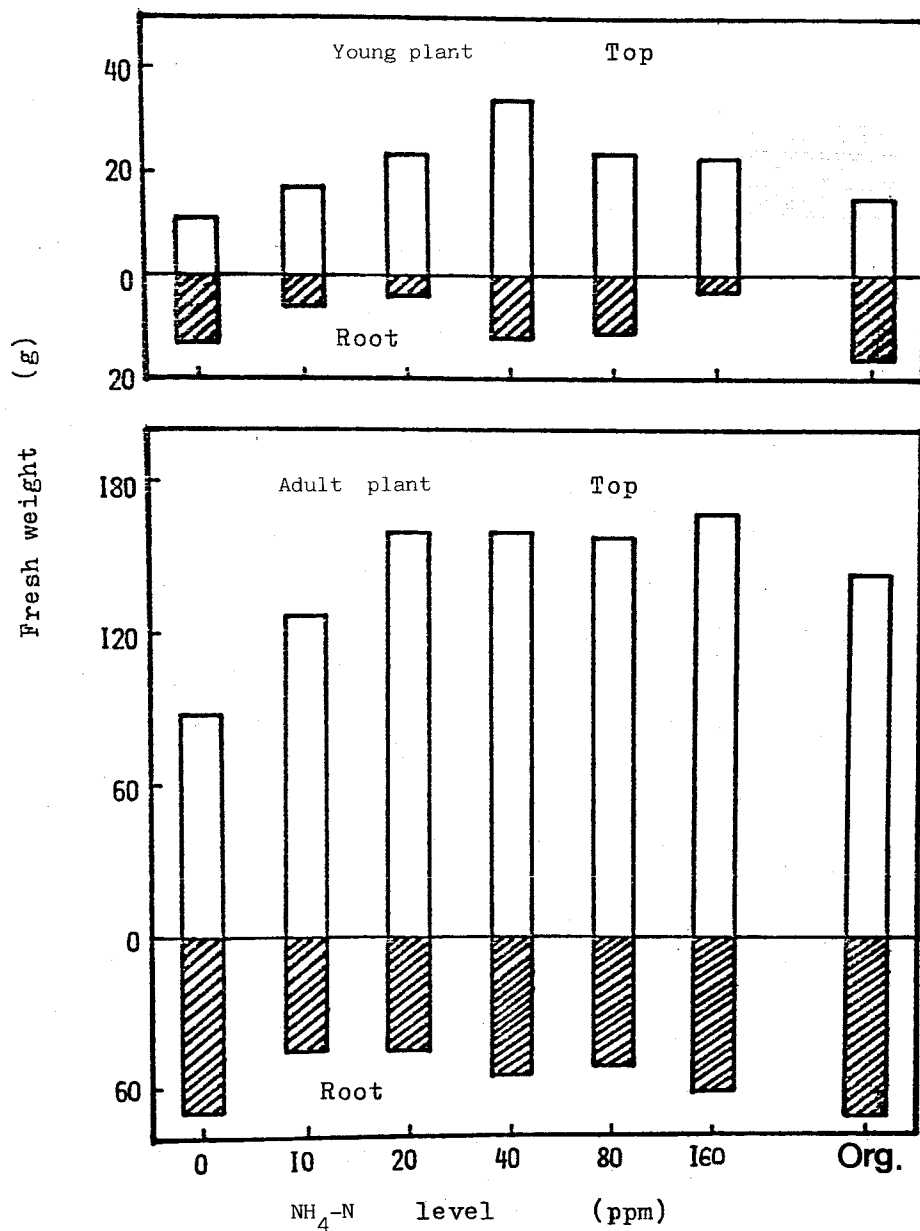


Figure 5. Effect of level of nitrogen on the growth of waterhyacinth.

Notes: Org. Pig's urine diluted (Total N: 6.4ppm)

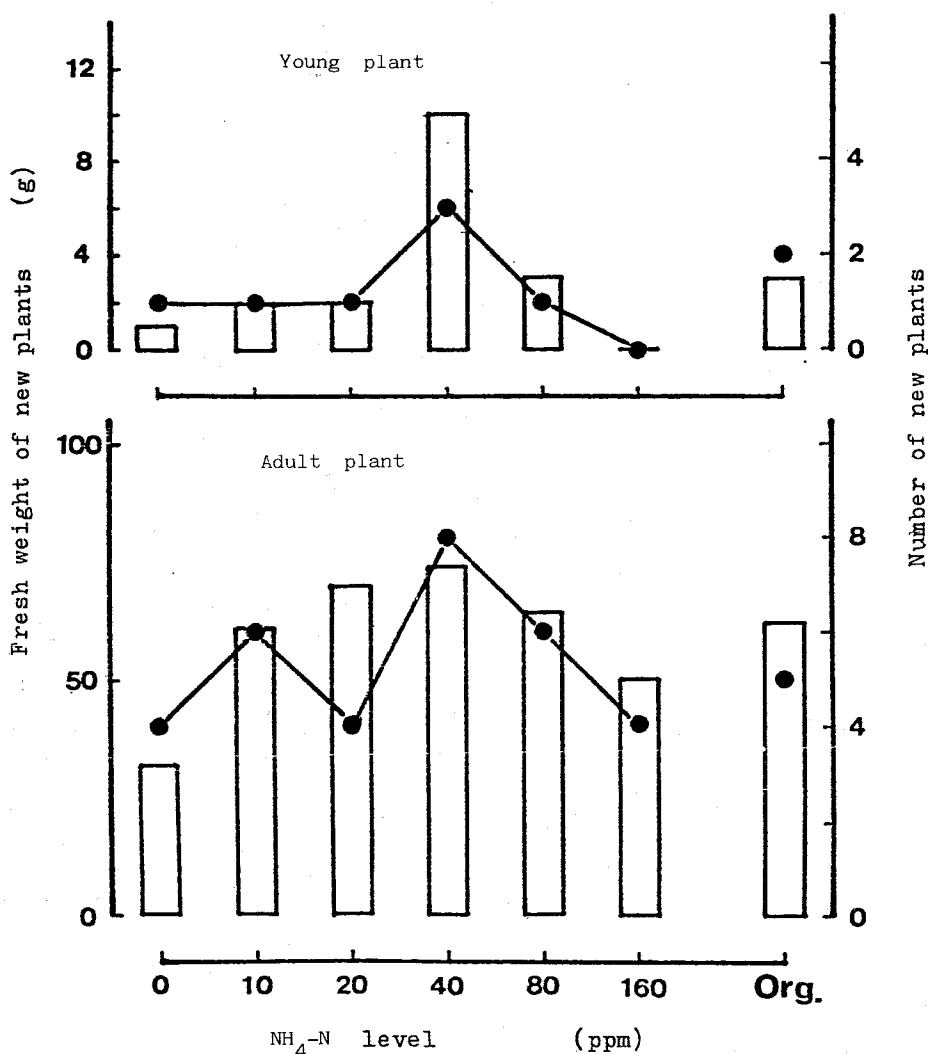


Figure 6. Effect of level of nitrogen on the growth of waterhyacinth.

Note: ●—● Number of new plants.

Org. Pig's urine diluted (Total N: 6.4ppm.)

これより、好適窒素濃度については成株の生長と栄養繁殖の間に違いが認められ、また植物体の齢によっても異なることが明らかになった。一方、対照として用いた豚尿尿希釈液 (Org. 区) に関しては、窒素濃度が低いにもかかわらず、10ppm 処理区と同じ程度の生育・繁殖を示したことが注目された。なお、外観は 0ppm の葉色のみが、やや黄色味を帯びて軟質で、また根量は多く

青紫色であったが、その他の濃度間には差がなかった。Org. 区は非常にストロンの伸長が盛んで長く、葉柄が丸味を帯びていることが、他の区と異なった点である。

## II) 茎葉部内の窒素含量

Fig. 7 から、成株・幼株共、培養液の窒素濃度が高まるにつれて、茎葉部内の窒素含有率は高くなっており、160ppmでは、成株：8.23%、幼株：7.43%にまで達した。徳永らは、<sup>146)</sup>液中の窒素濃度が10倍になっても、ホテイアオイ中の含量は、1.3倍程度であると報告しているが、本実験においても、ほぼ同様の傾向を示し、高濃度下に存在しても、体内の含量は、調節されながら増加していると考えられる。また、生育量と窒素含量との関係を調べたところ、成株においては、生育量の増加に窒素含量の増加が伴っているが、幼株では必ずしも生育量の増加と窒素含量の増加が一致していない。これより、幼株においては80ppm以上になると、窒素過剰から、代謝が乱され、生育抑制が生じると推察される。一方、Org. 区の窒素含量は、成株・幼株共、無機態処理区に応じた値を示し、特に際だった現象は認められなかった。

## 2. pHの影響

### (1) 実験材料及び方法

供試個体、実験期間、管理および測定事項（窒素含量は除く）は、本節1に準じた。培養液のpHを3, 4, 5, 6, 7, 8の各段階にHClとNaOHで調整した。窒素濃度は、アンモニア態窒素で20ppm、160ppmの2段階を設け、培養液組成はTable 1に示す通りである。

### (2) 実験結果及び考察

外観では、Table 3に示す通りpH 3, 4, 5の処理区で著しい生育障害を呈した。すなわちpH 3においては、障害程度が激しく正常葉が全くみられず、葉身と葉柄が茶褐色に変化し、新葉は萎縮し、葉脈に沿って葉縁部が黒ずんだ。pH 4, 5においても、pH 3ほどではないが、黒ずんだ半枯れ葉が多く出現した。生育障害の程度は概して20ppmより160ppmの方が、かつ成株より幼株の方が著しかった。根部においては、pH 3, 4ではどの処理区も、ほとんど白色の新根が認められなかった。Minshall & Scarth<sup>68)</sup>も、ホテイアオイを水耕培養

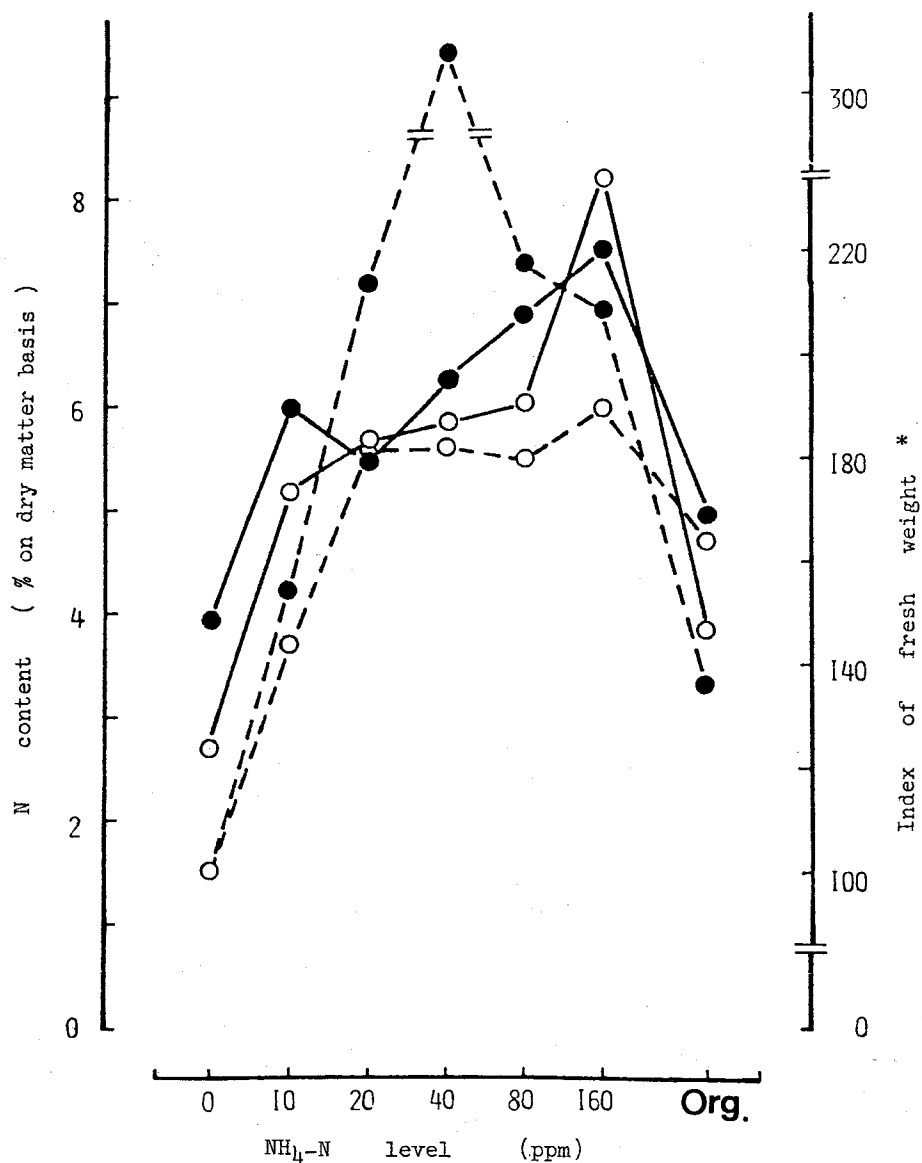


Figure 7. Nitrogen content of tops of plants grown in nutrient solutions with different  $\text{NH}_4\text{-N}$  levels.

Notes: ○—○ N content of Adult plant.

●—● N content of Young plant.

○---○ Fresh weight of Adult plant.

●---● Fresh weight of Young plant.

\* Fresh weight of plant grown in the N level of 0 ppm solution = 100.

Table 3. The number of normal leaves of waterhyacinth plants grown in nutrient solutions with different pH levels.

| N level<br>(ppm) | pH | Adult plant             |     |       |          | Young plant             |     |       |          |
|------------------|----|-------------------------|-----|-------|----------|-------------------------|-----|-------|----------|
|                  |    | Number of normal leaves |     |       |          | Number of normal leaves |     |       |          |
|                  |    | Mother                  | New | Total | Increase | Mother                  | New | Total | Increase |
| 20               | 3  | 1                       | 1   | 2     | -4       | 0                       | 0   | 0     | -3       |
|                  | 4  | 6                       | 6   | 12    | 6        | 1                       | 0   | 1     | -2       |
|                  | 5  | 7                       | 1   | 8     | 2        | 5                       | 0   | 5     | 1.5      |
|                  | 6  | 10                      | 12  | 22    | 17       | 5                       | 1   | 6     | 3        |
|                  | 7  | 11                      | 11  | 22    | 16       | 5                       | 1.5 | 6.5   | 4        |
|                  | 8  | 9                       | 12  | 21    | 15       | 4                       | 0   | 4     | 1.5      |
| 160              | 3  | 0                       | 0   | 0     | -7       | 0                       | 0   | 0     | -3.5     |
|                  | 4  | 6                       | 4   | 10    | 4        | 4                       | 0   | 4     | 1        |
|                  | 5  | 4                       | 2   | 6     | 0        | 0                       | 5   | 5     | 2        |
|                  | 6  | 7.5                     | 2   | 9.5   | 4.5      | 2                       | 0   | 2     | 0.5      |
|                  | 7  | 8                       | 10  | 18    | 13       | 0                       | 0   | 0     | -2.5     |
|                  | 8  | 12                      | 10  | 22    | 16       | 4                       | 0   | 4     | 1.5      |

した場合、pH 4 以下では根の細胞分裂および細胞伸長が損われたと報告している。一方、総新鮮重による生育差をFig. 8 に示したが、pH 7 付近で生育が良好であった。これは、発生水域のpH 値とはほぼ一致する。Parija,<sup>86)</sup> Chadwick & Obeid<sup>77)</sup> 及び Santiago<sup>105)</sup> も同様の結果を報告している。また、20 ppm では好適pH の範囲が5 ~ 8 と広い傾向があるのに対し、160 ppm ではpH 7 のみであった。ただ、幼株 160 ppm で、pH 3, 4 の比数が比較的高いが、これは実験開始時の新鮮重に少しばらつきがあった為で、増加量としては、pH 4, 5, 6 ではほとんど差がなく、pH 3 で最も少ない。同様に、新しく形成された子株の生育量に対するpH の影響を、Fig. 9 に示したところ Fig. 8 と同

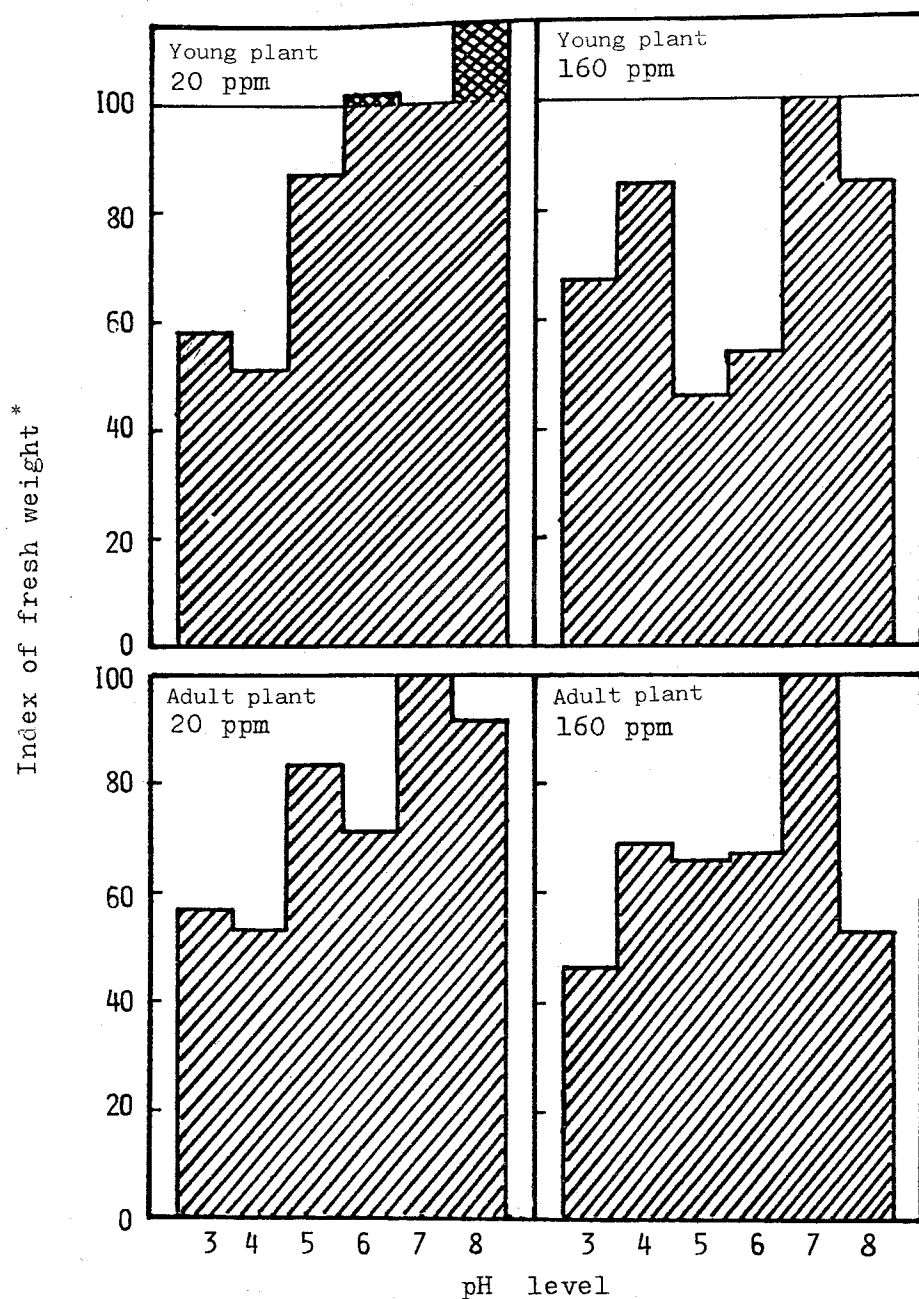


Figure 8. Growth of waterhyacinth plants grown in nutrient solutions with different pH levels.

Note: \* Fresh weight of plants grown in the pH 7.0 solution = 100.



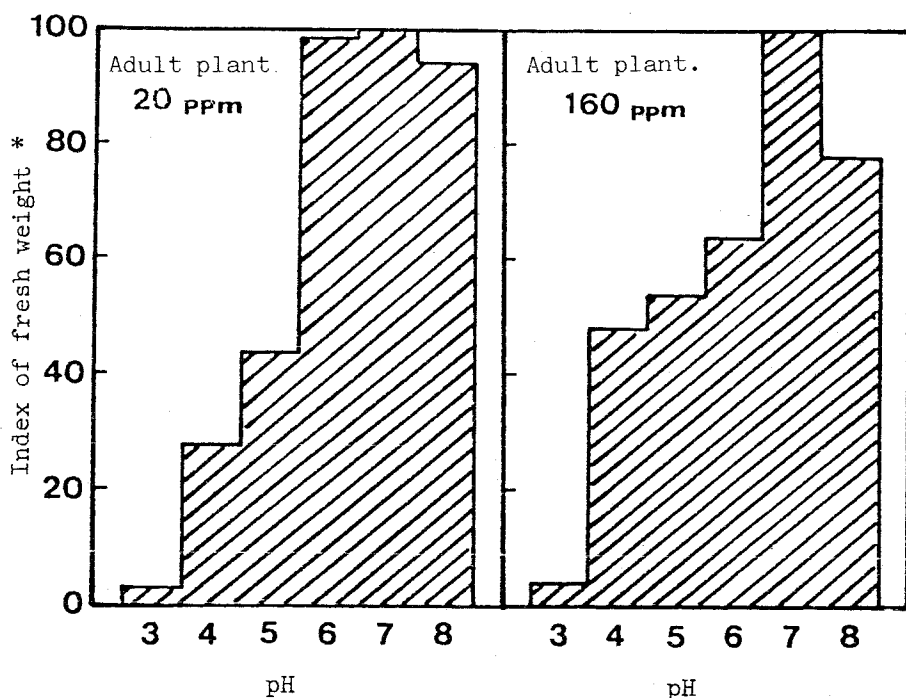


Figure 9. Growth of new plants grown in nutrient solutions with different pH levels.

Note: \* Fresh weight of plants grown in the pH 7.0 solution = 100.

じ傾向が認められた。しかし、このpH間の子株の生育量の差は子株の形成数に依存するものではないかと考えられる。

次に培養液の更新毎にpHを測定したので、ホテアオイを培養することにより、どのように培養液のpHが変化するかFig. 10に、その測定値の一部を示した。大気中のCO<sub>2</sub>や植物の呼吸作用に因るCO<sub>2</sub>が溶け込んだり、あるいは、植物の塩類吸収の影響から、特に水耕培養の場合はpHの変動が大きい、本実験も、4日間で最初に調整したpH値から著しく変化した。変動の幅はpH 3, 4にて小さく、pH 5, 6にて大きい。成株ではすべてのpH区で、pH値が調整時より下がっており、窒素源としてアンモニア態を使用しているので、塩類吸収の結果、酸性側に傾いたとも考えられるが、幼株では、pH 8を除いて

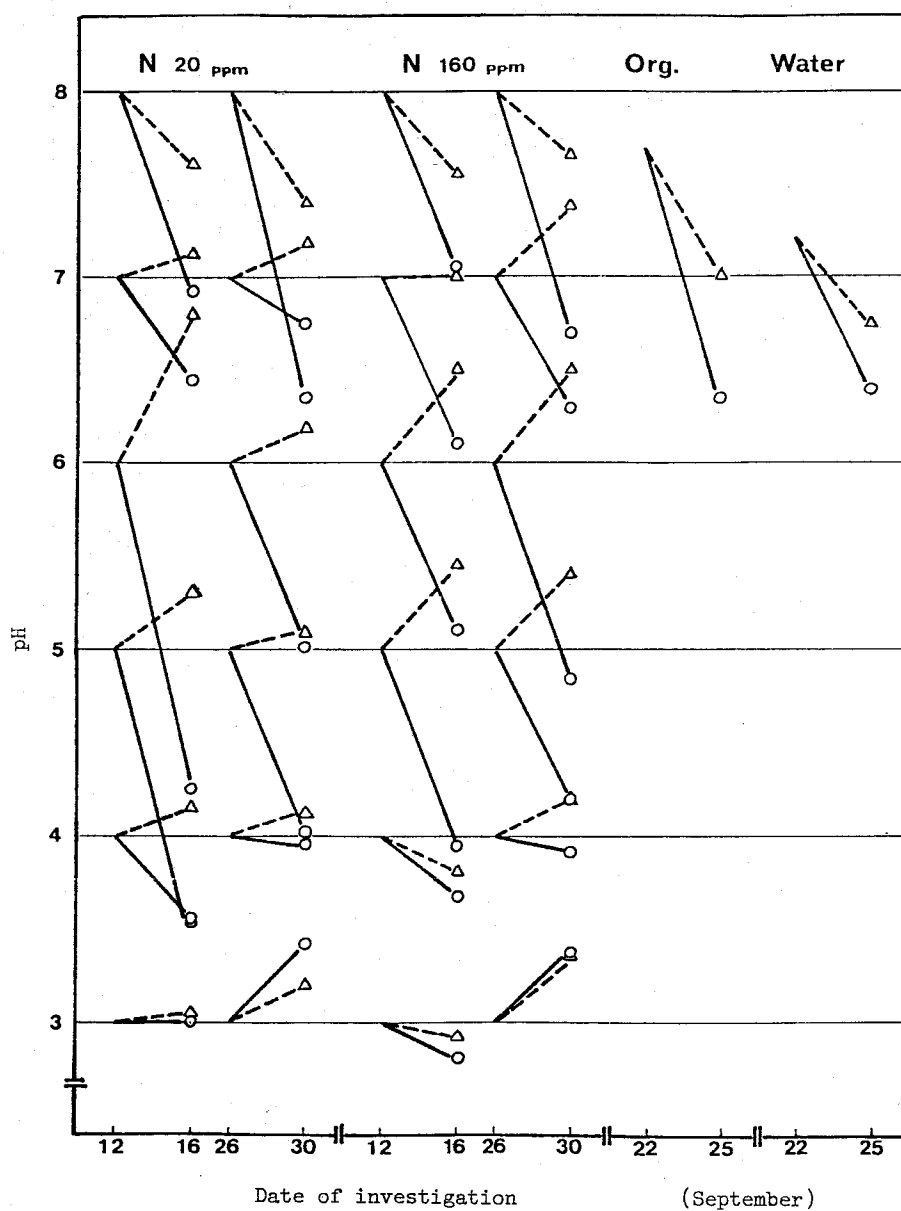


Figure 10. Change in pH of the culture solution brought about by waterhyacinth.

Notes: ○—○ Adult plant  
 ▲—▲ Young plant.

すべて調整時より上昇している。このように、植物体の齢により、pHの変化の傾向が異なることは注目すべきことである。また、Haller<sup>39)</sup>は、ホテイアオイは、塩基性側・酸性側のどちらで培養しても、中性付近にpHを変化させる傾向があると報告しているが、本実験では、幼株については、その傾向が認められる。このように、植物自身が最適pH値を保持する為に根からある種の物質を分泌していることも推測され、今後、液とホテイアオイ根群との相互関係については、さらに詳しい検討を必要とする。

### 3. 窒素形態の影響

#### (1) 実験材料及び方法

供試個体は葉数5～6枚、新鮮重40g前後の成株で子株は切除した。実験は7月12日より開始し、27日間ビニールハウス内で行なった。窒素形態については $\text{NH}_4\text{-N}$ のみ、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の混合(5:5)および $\text{NO}_3\text{-N}$ のみの3処理区とし、その各々について、さらにpHを5, 6, 7, 8に調節した区を設けた。また、総窒素濃度は0, 20, 160ppmを設定した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ としては、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ を、 $\text{NO}_3\text{-N}$ としては、 $\text{NaNO}_3$ を使用し窒素以外の要素についてはTable 1に示す培養液を与えた。ポリエチレン容器に40ℓの培養液を入れ1処理区とし、4個体を供試した。液の交換は1週間毎に行ない、pHは隔日1/10N NaOH、1/10N HClにて調節した。適宜、生育調査を行い実験終了後、親株・子株別に、また、その各々に対して、茎葉部と根部別に新鮮重を測定し、1昼夜80℃で乾燥後、乾物重を測定、その後小型粉碎機で粉碎して親株の茎葉部のみ分析試料とした。茎葉部内の窒素含量はガンニング変法、<sup>118)</sup>リンはバナドモリブデン酸アンモニウム法<sup>118)</sup>、カリウム、カルシウム、マグネシウム及び鉄は原子吸光分光分析法<sup>118)</sup>により分析した。

#### (2) 実験結果及び考察

##### 1) 生育状況

##### a. 各窒素形態区におけるpHの影響

Fig.11に実験終了時の総新鮮重による生育量の差を示した。まず20ppmにおいては、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区では、pHの上昇に伴い新鮮重及び子株形成数の増加が、顕著にみられた。 $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ 区は、中性からやや塩基性側で生育が良

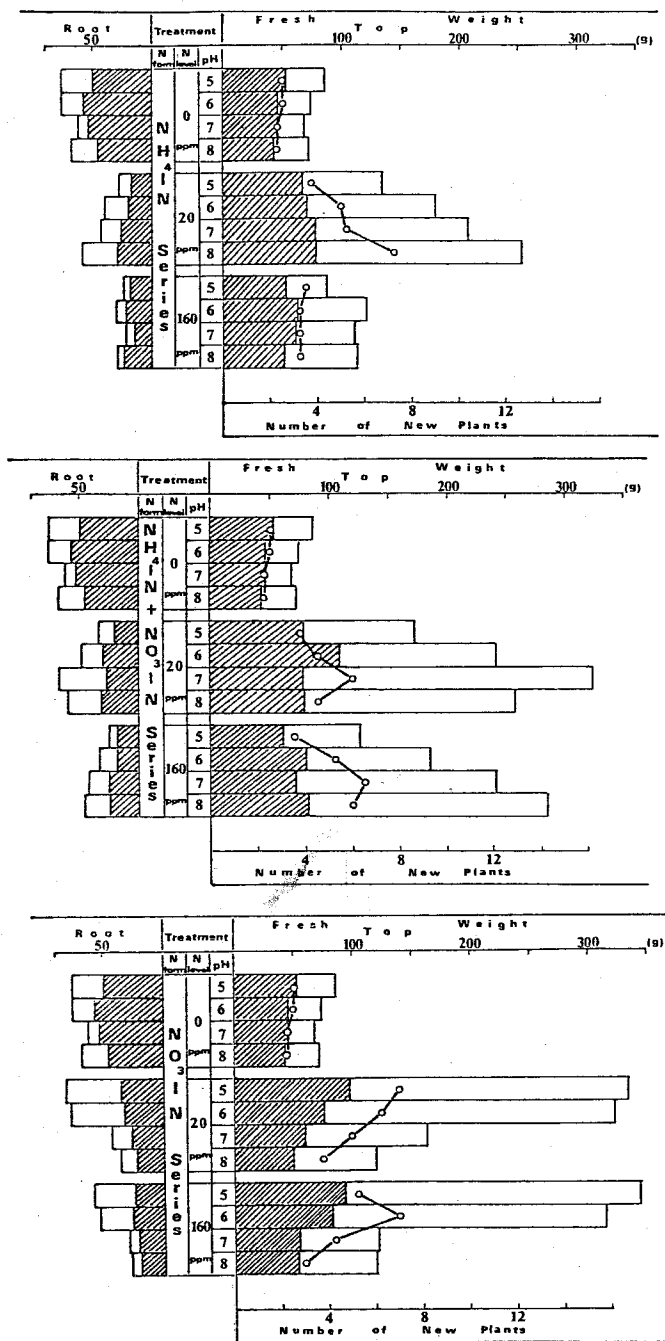





Figure 11. Influence of nitrogen form and pH on fresh weight and the number of new plants.

Notes:  Mother plant.  New plant.  
 Number of new plants.

く、比較的広範囲なpHでも生育良好であった。それに反して、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区は、pH 5, 6側で生育が促進され、pH 7, 8側で抑制されていた。Pirschle<sup>107)</sup>や奥田ら<sup>99)</sup>によると、植物の窒素給源として $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ のいずれが優れているかは、特に培養液のpHによることを強調しており、作物におけるpHの研究は非常に多い。その多くの結果から、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の場合は塩基性側で生育が良く、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の場合は酸性側で良好な生育を示すといわれている。<sup>50, 51)</sup> ホテイアオイにおいても、同様の結果が得られた。また、160ppmにおいても20ppmと同様の傾向を示しているが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区のみ、pHに関係なく葉質が硬くなり、褐色化した部分が目立ち著しく生育が抑制され、0ppmと大差ない生育量となった。これは、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 高濃度の害作用の為と考えられる。この $\text{NH}_4\text{-N}$ 区160ppmにおける生育阻害は、本節1における成株の結果と異なった為、原因を推察した。Fig. 12およびFig. 13に実験期間中の培養液の水温変化を示し

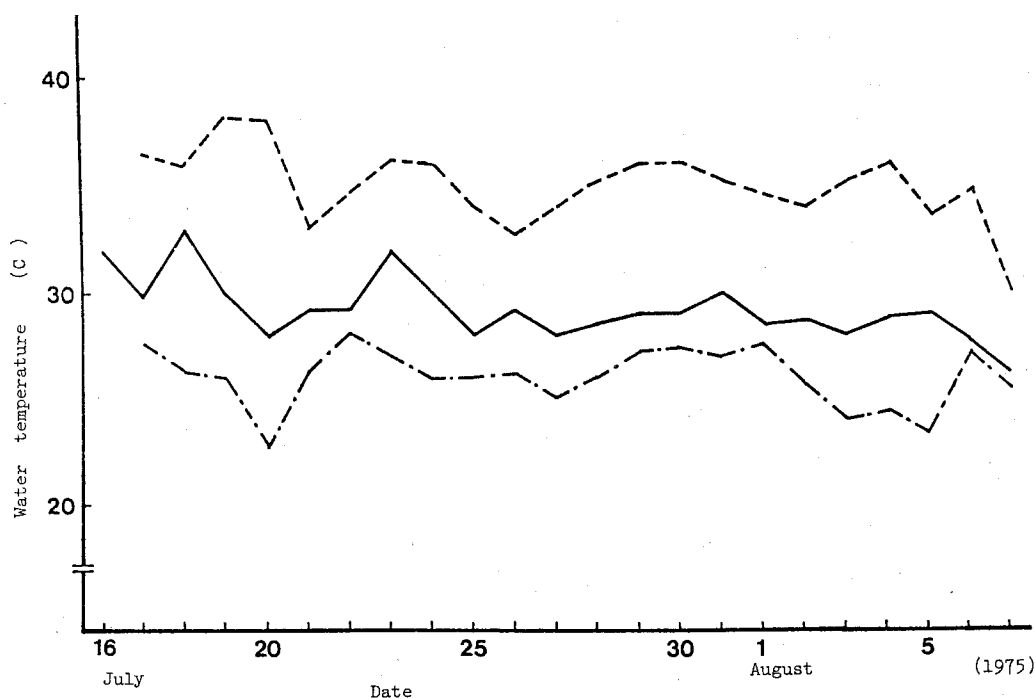


Figure 12. Change in the water temperature of culture solution during experimental periods.  
(Experiment 3,5)

Notes: ——— 11:00 A.M. water temperature.  
 ----- The daily maximum water temperature.  
 - · - · - The daily minimum water temperature.

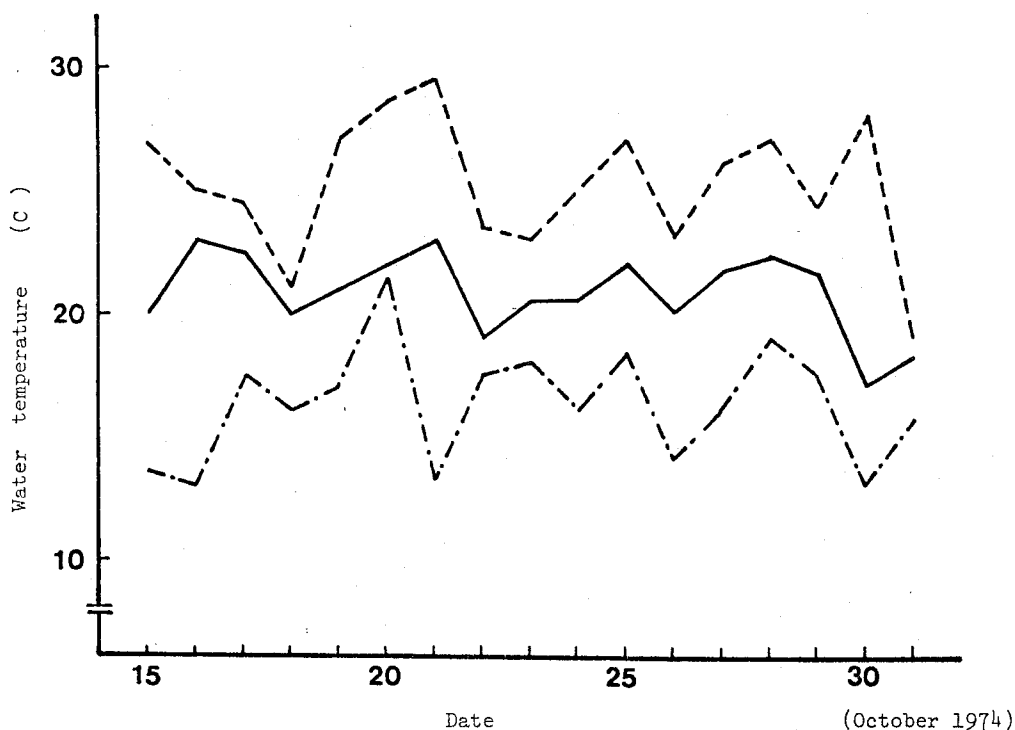


Figure 13. Change in the water temperature of culture solution during experimental periods. (Experiment 1,2)

Notes: — 11:00 A.M. water temperature.  
 --- The daily maximum water temperature.  
 - · - The daily minimum water temperature.

たが、これより本実験は前実験の場合と比較して、日最高水温が40℃を越える高温条件下で行った為、Penfound<sup>102)</sup>らが認めている高温障害を起こし、かつ過剰窒素と相まって生育障害をひきおこしたのではないかと推察される。

Engel<sup>32)</sup>も夏期の方がアンモニア中毒に敏感であると報告している。次に0 ppmでは、pH間の差は認められず、一様に生育は劣り葉質は柔らかく、葉色は黄色味を帯びた。また、茎葉部に対する根部の生育量が大きく、根部は青紫色を呈した。

#### b. pHが一定の場合における各窒素形態間の生育差異

生育差は親株間では、ほとんど認められず、新しく形成された子株の数およびその生育量に依存していたので、その結果をFig. 14に示した。すなわちpH

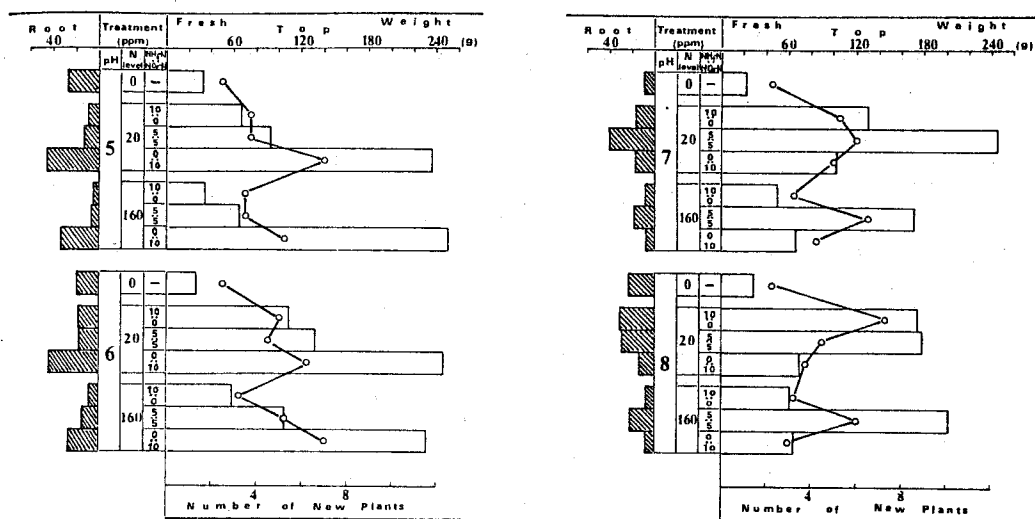


Figure 14. Influence of nitrogen form and pH on the growth of new plants.

Note : ●—● Number of new plants.

5, 6においては $\text{NO}_3\text{-N}$ 区が、他の2区より著しく生育良好で、pH 7, 8 では $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ 区が優勢である。この傾向は、岩田<sup>51)</sup>によるコカブの生育の傾向に類似している。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区は、最大生育量を示す最適pH値8付近にて、ほぼ $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ 区と同じ生育量に達しているが、概して他の2区と比較して生育が劣った。一方、根部における各形態間の生育差を調べると、いずれの区も茎葉部の生育差に伴う傾向を示しており、Bennettら<sup>12)</sup>はトウモロコシにおいて、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区は $\text{NO}_3\text{-N}$ 区に比べ、根の発育が悪く黒ずんでいると報告しているが、そのような傾向は認められなかった。また、Table 4に乾物重による生育差を示したが、新鮮重の場合と同様の傾向を示した。

ところで、pH調整2日後の培養液のpHの変化を、Fig. 15に示したが、塩類吸収の結果、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区では酸性側に、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 区では塩基性側に傾いている。 $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ 区については、いずれのpH区でも酸性側に傾いていることが特に注目された。両窒素源を同一溶液に含む場合、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ とが必ずしも均等に吸収されるとは限らない。<sup>117)</sup>培養液のpH、濃度、温度、および植物体の種類、齡、植物自体の貯蔵物質等に因るからであるが、本実験の



Table 4. Influence of nitrogen form and pH on dry weight of waterhyacinth plants.

|              | pH | NH <sub>4</sub> -N Series |       |      | NH <sub>4</sub> -N+NO <sub>3</sub> -N Series |       |       | NO <sub>3</sub> -N Series |       |                     |
|--------------|----|---------------------------|-------|------|--|-------|-------|---------------------------|-------|---------------------|
|              |    | N level (ppm)             |       |      | N level (ppm)                                |       |       | N level (ppm)             |       |                     |
|              |    | 0                         | 20    | 160  | 0  | 20    | 160   | 0                         | 20    | 160                 |
| Mother Plant | 5  | 5.48                      | 4.74  | 3.67 | 5.48   | 5.52  | 4.74  | 5.48                      | 7.08  | 5.93 <sup>(9)</sup> |
|              | 6  | 5.63                      | 5.19  | 4.44 | 5.63   | 7.27  | 5.34  | 5.63                      | 5.75  | 5.32                |
|              | 7  | 5.45                      | 5.10  | 3.88 | 5.45   | 5.67  | 5.06  | 5.45                      | 7.42  | 4.25                |
|              | 8  | 4.93                      | 5.49  | 3.62 | 4.93   | 5.85  | 5.79  | 4.93                      | 4.27  | 4.21                |
| New Plant    | 5  | 3.25                      | 4.06  | 2.12 | 3.25   | 5.10  | 4.30  | 3.25                      | 13.25 | 13.21               |
|              | 6  | 2.97                      | 6.44  | 3.37 | 2.97   | 6.99  | 5.58  | 2.97                      | 13.75 | 10.80               |
|              | 7  | 1.61                      | 7.01  | 3.37 | 1.61   | 13.90 | 8.33  | 1.61                      | 5.58  | 3.66                |
|              | 8  | 2.71                      | 9.67  | 3.60 | 2.71   | 9.93  | 10.75 | 2.71                      | 4.19  | 3.75                |
| Total        | 5  | 8.73                      | 8.80  | 5.79 | 8.73   | 10.62 | 9.04  | 8.73                      | 20.33 | 19.14               |
|              | 6  | 8.60                      | 11.63 | 7.81 | 8.60   | 14.26 | 10.92 | 8.60                      | 19.53 | 16.12               |
|              | 7  | 7.06                      | 12.11 | 7.25 | 7.06   | 19.48 | 13.39 | 7.06                      | 13.00 | 7.91                |
|              | 8  | 7.64                      | 15.16 | 7.22 | 7.64   | 15.78 | 16.54 | 7.64                      | 8.64  | 7.96                |

場合、混合区がNH<sub>4</sub>-N区と同じ傾向を示していることにより、NH<sub>4</sub>-NがNO<sub>3</sub>-Nより選択的に吸収されていることがうかがわれた。

## II) 茎葉部の無機成分含量

親株茎葉部の各無機成分含有率をFig. 16およびTable 5に示した。0 ppmと比較して、窒素を与えることにより増加している成分は窒素とリンで、減少している成分は、カルシウムとマグネシウムである。カリウムについては20 ppmで増加、160 ppmで減少の傾向が認められる。一方、個々の成分について検討すると、各形態間及びpHにより差が生じた。窒素含有率は、NO<sub>3</sub>-N区に比べNH<sub>4</sub>-N区が常に高く、pHが高まるにつれ、また窒素濃度が高いほど、その傾向は大きい。特に、生育に障害が認められた160 ppm NH<sub>4</sub>-N区においては、pHの上昇に伴い著しく含有率が増加している。NH<sub>4</sub>-N区の方が窒素の含有率が高いという結果は、トマト<sup>26, 93)</sup>タバコ<sup>135)</sup>、その他多くの蔬菜<sup>52)</sup>に認められている。また、ホテイアオイは概して体内で高い窒素含有率を示しているが、どのような形態で蓄積されているのか、今後検討を要する。同じ増加の傾向を示すリンに関しても、NH<sub>4</sub>-N区の含有率が高く、NO<sub>3</sub>-N区は、

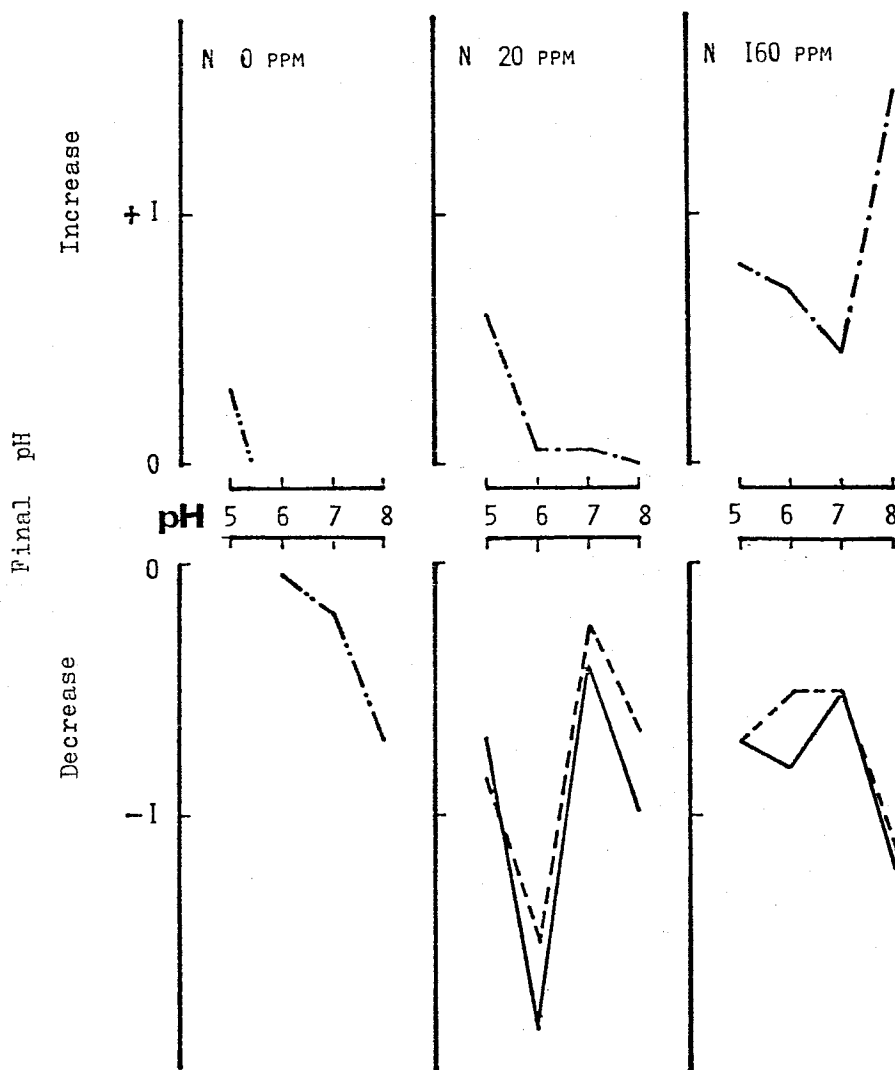


Figure 15. Change in pH of the nutrient solution after two days renewed the solution.

Notes:   
 ———  $\text{NH}_4\text{-N}$       - - - - -  $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$    
 - · - · -  $\text{NO}_3\text{-N}$

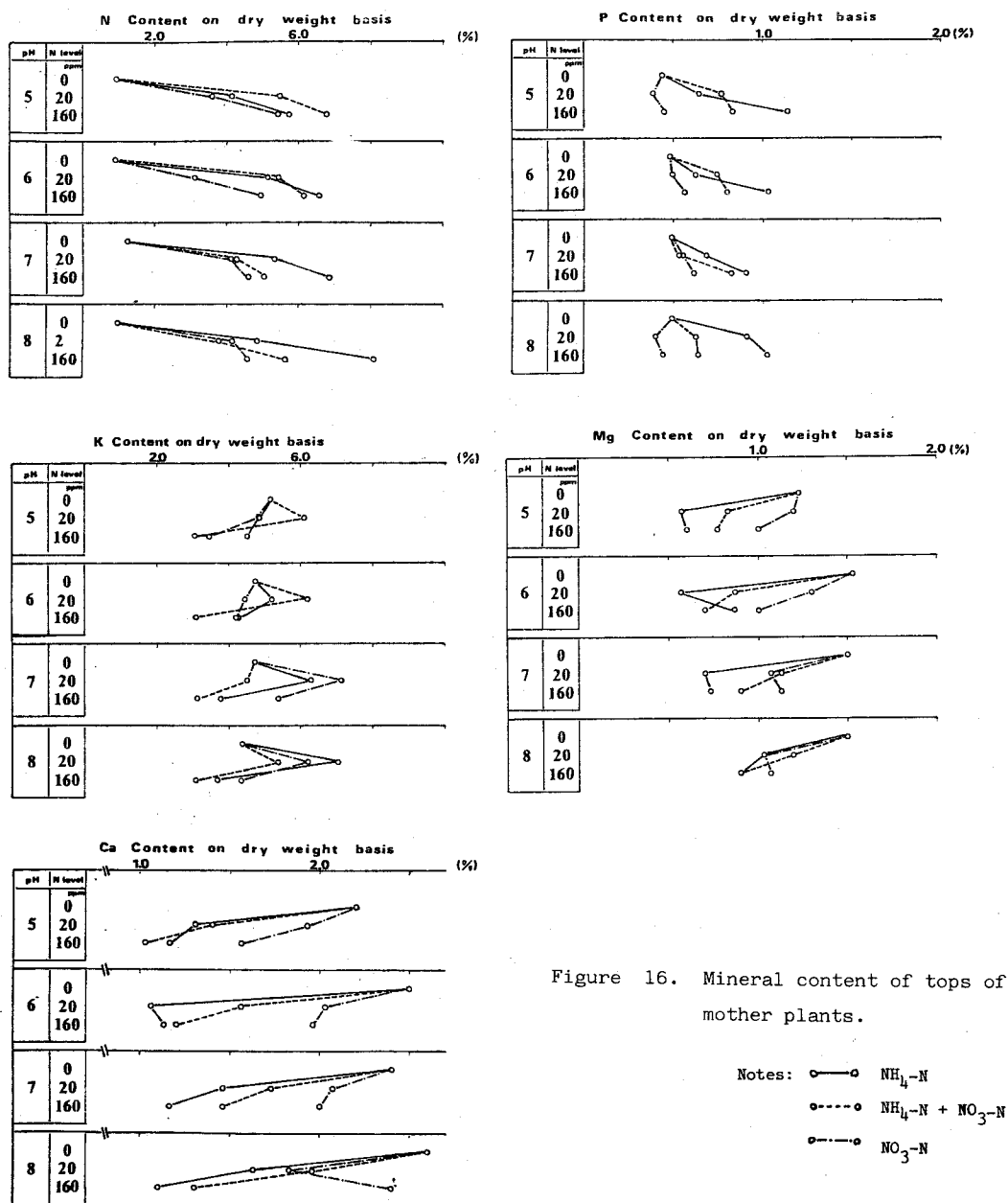


Figure 16. Mineral content of tops of mother plants.

0 ppm の場合と差がなく、pH 5, 8 においては減少さえみられる。この  $\text{NH}_4\text{-N}$  区にリン含有率が高い傾向も、多くの研究者が認めるところである。<sup>137)</sup> おそらく、 $\text{NO}_3$  イオンと P イオンとの陰イオン間の拮抗、あるいは  $\text{NH}_4\text{-N}$  区の根の吸収面の pH が低く、リンを有効状態に保っていることが関係しているのではないかと考えられる。また、いずれの区も含有率は pH に影響されてお

Table 5. Mineral content of tops of mother plants based on dry weight.

| NH <sub>4</sub> -N Series |         |      |      |      |      |      | NH <sub>4</sub> -N + NO <sub>3</sub> -N Series |      |      |      |      |      | NO <sub>3</sub> -N Series |      |      |      |      |      | (%)   |
|---------------------------|---------|------|------|------|------|------|--|------|------|------|------|------|---------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| N                         | P       | K    | Ca   | Mg   | Fe   |      | N  | P    | K    | Ca   | Mg   | Fe   | N                         | P    | K    | Ca   | Mg   | Fe   |       |
| N level                   | 0 ppm   |      |      |      |      |      |  |      |      |      |      |      |                           |      |      |      |      |      |       |
| pH                        | 5       | 0.93 | 0.44 | 5.16 | 2.20 | 1.23 | 0.078  |      |      |      |      |      |                           |      |      |      |      |      |       |
|                           | 6       | 0.90 | 0.48 | 4.73 | 2.50 | 1.53 | 0.069  |      |      |      |      |      |                           |      |      |      |      |      |       |
|                           | 7       | 1.25 | 0.49 | 4.70 | 2.40 | 1.50 | 0.069  |      |      |      |      |      |                           |      |      |      |      |      |       |
|                           | 8       | 0.98 | 0.49 | 4.36 | 2.60 | 1.50 | 0.058  |      |      |      |      |      |                           |      |      |      |      |      |       |
| N level                   | 20 ppm  |      |      |      |      |      |  |      |      |      |      |      |                           |      |      |      |      |      |       |
| pH                        | 5       | 4.13 | 0.64 | 4.83 | 1.30 | 0.57 | 0.111  | 5.48 | 0.77 | 6.16 | 1.40 | 0.83 | 0.141                     | 3.58 | 0.39 | 4.80 | 1.93 | 1.20 | 0.064 |
|                           | 6       | 5.13 | 0.62 | 5.20 | 1.06 | 0.57 | 0.114  | 5.45 | 0.74 | 6.20 | 1.56 | 0.87 | 0.146                     | 3.10 | 0.49 | 4.43 | 2.03 | 1.30 | 0.075 |
|                           | 7       | 5.33 | 0.68 | 6.30 | 1.46 | 0.70 | 0.105  | 4.28 | 0.53 | 4.50 | 1.73 | 1.13 | 0.042                     | 4.13 | 0.55 | 7.13 | 2.06 | 1.07 | 0.081 |
|                           | 8       | 4.83 | 0.91 | 7.03 | 1.63 | 1.03 | 0.067  | 3.78 | 0.62 | 5.36 | 1.96 | 1.20 | 0.068                     | 4.15 | 0.40 | 6.20 | 1.83 | 1.03 | 0.050 |
| N level                   | 160 ppm |      |      |      |      |      |  |      |      |      |      |      |                           |      |      |      |      |      |       |
| pH                        | 5       | 5.73 | 1.14 | 4.50 | 1.16 | 0.60 | 0.172  | 6.78 | 0.83 | 3.03 | 1.03 | 0.77 | 0.093                     | 5.43 | 0.45 | 3.43 | 1.56 | 1.00 | 0.068 |
|                           | 6       | 6.58 | 1.03 | 4.26 | 1.13 | 0.87 | 0.050  | 6.15 | 0.80 | 3.06 | 1.20 | 0.70 | 0.087                     | 4.95 | 0.56 | 4.20 | 1.96 | 1.00 | 0.088 |
|                           | 7       | 6.85 | 0.91 | 3.76 | 1.06 | 0.73 | 0.076  | 5.03 | 0.82 | 3.10 | 1.46 | 0.90 | 0.074                     | 4.60 | 0.61 | 5.36 | 2.00 | 1.13 | 0.057 |
|                           | 8       | 6.08 | 1.02 | 3.66 | 1.10 | 0.90 | 0.066  | 5.63 | 0.63 | 3.06 | 1.30 | 0.90 | 0.065                     | 4.58 | 0.44 | 4.33 | 2.40 | 1.07 | 0.093 |

らず、他の蔬菜類と比較して、やや高い値を示しているが、ホテイアオイはリン酸の貯蔵量が多いという報告もある。<sup>146)</sup> カリウム含有率の場合は、pHにより各形態間の含有率は大きく異なる。一般にカリウムは条件により変化を受け易いとされており、NaNO<sub>3</sub>を使用した場合、Na イオンとの関係から高濃度の場合、カリウム含量が減少するという報告がある。<sup>52)</sup> 本実験においても160 ppm でカリウム含有率が低い。また、徳永ら<sup>146)</sup>は、ホテイアオイのカリウム貯蔵能が大きいという報告を行っているが、本実験においても茎葉部内のみではあるが、高い含有率が示された。一方、無窒素区と比べ減少の傾向を示している同じ陽イオンのカルシウム、マグネシウムに関しては、いずれのpH値でも、NO<sub>3</sub>-N区がNH<sub>4</sub>-N区より顕著に高い含有率を示している。NH<sub>4</sub>イオンとCaイオンおよびMgイオンとの間に強い拮抗作用がある為と考えられ、本実験と同様の結果が他にも報告されている。<sup>135, 136)</sup> さらに、20ppmNH<sub>4</sub>-N区は両成分共、pH上昇に伴い含有率が高くなっており、生育量増加と同じ傾向が認められたが、タバコにおいても同じ傾向があり<sup>138)</sup>カルシウムとマグネシウムは窒素の正常な同化に好影響を及ぼしていると考えられている。また、カルシウムに関しては、窒素濃度による含有率の変動の幅が他の成分と比較して大きい、全体に含有率は他の植物より高い。Easley<sup>31)</sup>も、水生植物の無機成分含量を分析した結果、ナトリウム・鉄・カルシウムが陸生植物より高い傾向があ

るが、特にホテイアオイはカルシウムが高く、牛の飼料に適すると報告している。鉄については、 $\text{NO}_3^-$ -N 区が他の 2 区よりやや含有率が低く pH の影響が認められないのに対して、他の 2 区では塩基性側で減少している。総じて各窒素形態間および pH 間で、無機成分含有率の増減が大きく影響されるのは、 $\text{NH}_4^+$ -N 区であった。今後更に、根部あるいは新しく形成された子株についても、無機成分含有量を分析し、ホテイアオイの無機成分吸収量を検討することが、利用および防除の面からも重要と考えられる。

### 第 3 節 リン並びにカルシウムが生育・繁殖に及ぼす影響

窒素・リンがホテイアオイの生育および繁殖に影響を与えていることは、多くの一致した見解であるが、<sup>128)</sup> 窒素に対する反応は第 2 節にて明らかにした。従って、本節は残るリンとカルシウムについて濃度を変えることにより、その生育・繁殖への影響を調べた。特にリンについては、ホテイアオイは窒素と同様に高い吸収力を示すことが知られており、<sup>111)</sup> また繁茂地は都市污水が流入していることが多いのでリン酸含量が高いと推測されリンに対する反応を検討することは重要と考えられた。

#### 1. リン濃度の影響

##### (1) 実験材料及び方法

供試個体、実験期間、管理および測定事項は第 2 節 3 の実験に準じる。

$\text{P}_2\text{O}_5$  濃度として、0, 2.5, 5, 10, 20, 40ppm の処理区を設け、各処理区共、窒素濃度はアンモニア態で 20ppm とし、その他の成分は Table 1 に示す培養液とした。培養原液は蒸留水で希釈し、pH は 7 付近に保った。

##### (2) 実験結果及び考察

###### i) 生育状況

Fig. 17 に実験終了時の新鮮重と子株形成数を示したが、 $\text{P}_2\text{O}_5$  20ppm (P: 8.7ppm) 以上で明らかに生育促進が認められた。また、0ppm で著しい生育抑制が認められず、子株も形成されていることから実験開始前に貯蔵されていたリンで生育阻害をまぬがれたと考えられる。一方、 $\text{P}_2\text{O}_5$  10ppm までは、

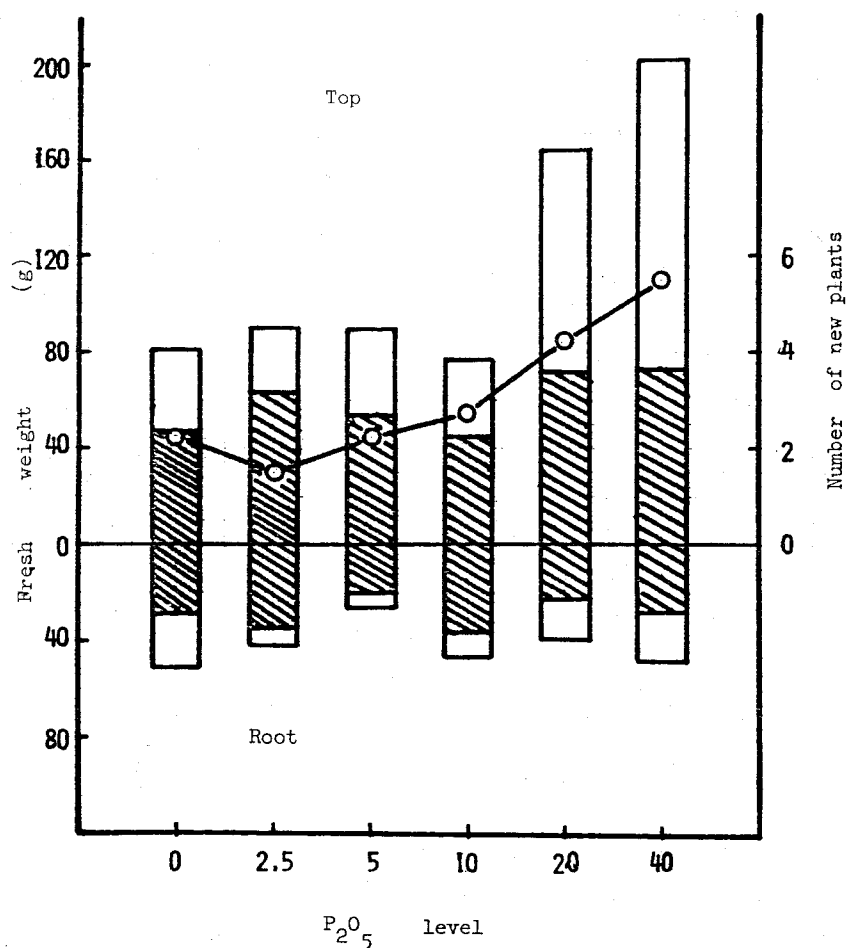





Figure 17. Growth of waterhyacinth plants grown in nutrient solutions with different phosphorus levels.

Notes:  Mother plant.  
 New plant,  
 Number of new plants.

植物自体が貯蔵していたリンの影響で外部から与えられたリン供給量の効果が抹殺されたと推察される。同様の実験を行っている Haller ら<sup>39)</sup>の報告によると  $P: 20 \text{ ppm}$  ( $P_2O_5: 46 \text{ ppm}$ ) で最大の生育を示し、それ以上の濃度では障害が生じるとされている。根部の生育に関しては、 $0 \text{ ppm}$  で  $T-R$  率が低く、根の生長が促進されたことを付記しておく。

## ii) 茎葉部の無機成分含量

リン濃度を变化させた場合の各要素含有率はFig. 18 に示した通りである。まず、培養液中のリン濃度が上昇すると、これに伴ってリン含有率が急上昇していることが注目される。また、リン供給に伴う窒素及びカリウム含有率の増加が認められるがこれは、リンが存在することにより根の代謝作用が盛んになり、さらに窒素とカリウムの吸収が盛んになった為と考えられる。しかし、 $P_2O_5$  20ppm 以上は窒素含有率が低くなり、カリウムにおいても含有率に差が生じなかった。鉄はリン濃度上昇に伴い低下しており、マグネシウムは、ほぼ一定で変化がなかった。

ところで、ホテイアオイのリン消費量が一般の植物の4倍であることが報告されているが、<sup>39)</sup> 本実験においてもリン濃度の上昇と共に植物体内の含有率が急増加、つまり吸収が高まり、かつ生育や増殖が盛んになることが認められたので、汚水の浄化などの利用の立場から、あるいは繁殖を防止する防除の立場の両面からリンがホテイアオイに及ぼす影響を重要視しなければならないと考えられる。

## 2. カルシウム濃度の影響

### (1) 実験材料及び方法

供試個体、実験期間、管理及び測定事項は本節1の実験に準じる。

CaO濃度として0, 5, 10, 20, 40, 80ppmの処理区を設け、窒素濃度はアンモニア態で20ppmとし、その他の成分は、Table 1 に示す培養液とした。pHは7付近に保った。

### (2) 実験結果及び考察

#### i) 生育状況

Fig. 19に実験終了時の新鮮重と乾物重を示した。Fig. 19よりCaO 5ppm (Ca:3.6ppm) 以上で生育が促進されていることが明らかになった。

ところで、Fig. 19からはCaO 5ppmで最も生育良好のようにみうけられるが、増加量で比較すると20ppmを最高に、40ppmを除いてほぼ大差なかった。40ppmは、日焼け現象に似た症状を呈して、生育が劣ったが、その原因は解明できなかった。これより、窒素やリン酸のように、それ自身が代謝作用の中

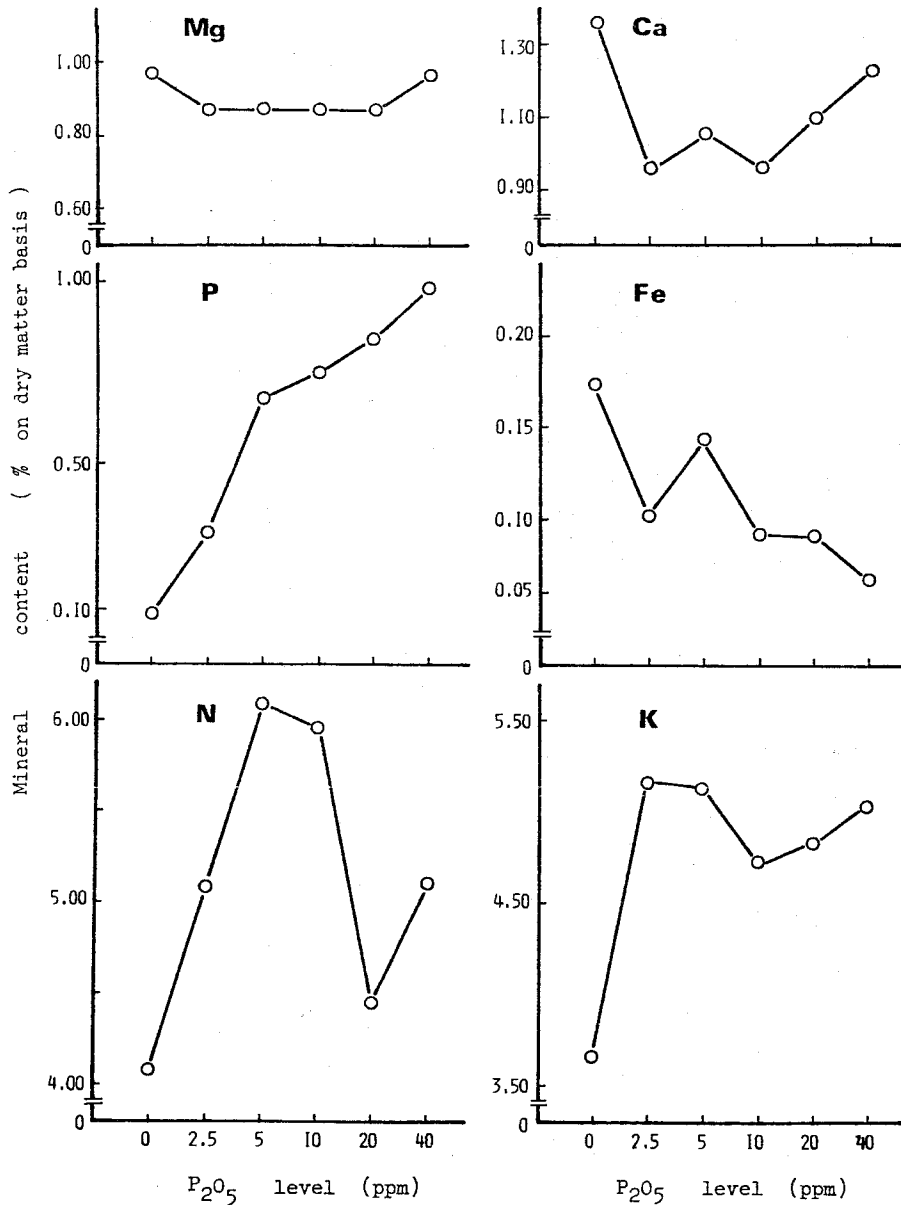


Figure 18. Effect of different phosphorus levels on mineral content of tops of mother plants.

に入り、体構成成分となり吸収と代謝が結び付いて行われる要素であれば最適濃度や過剰現象が生じるが、カルシウムのように代謝作用の触媒的働きをしている要素においては、最低限界濃度があって、<sup>140)</sup> その濃度以下では著しく生育が悪化するが、その濃度以上であれば生育は常に正常に保たれ生育量にさほど



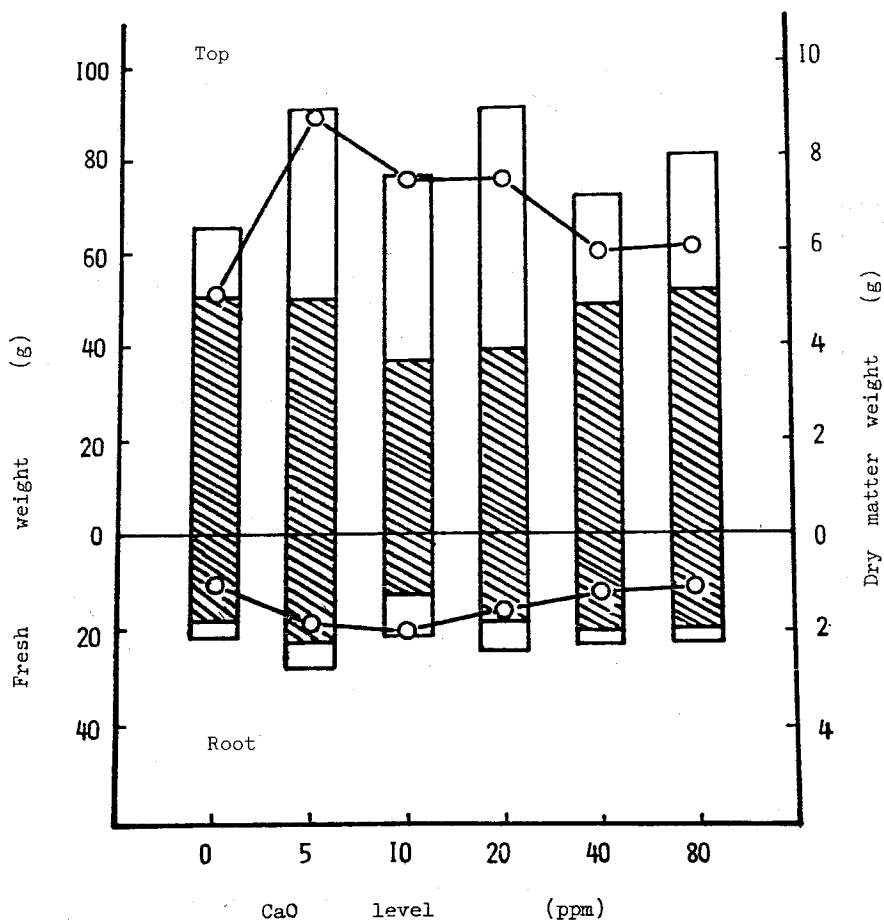


Figure 19. Growth of waterhyacinth plants grown in nutrient solutions with different calcium levels.

Notes: Mother plant.  
 New plant.  
 Dry matter weight.

差が生じないと考えられる。ホテイアオイの場合、その限界濃度がCaO : 5 ppm (Ca : 3.6 ppm) 付近と推察される。未発表資料であるが、ホテイアオイ発生水域のカルシウム含有量を測定した結果、Ca : 6 ppm 前後であった。

## ii) 茎葉部の無機成分含量

親株茎葉部の無機成分含有率をFig. 20に示した。まず、培養液の濃度変化とカルシウム含有率の変化をみると、濃度上昇に伴うカルシウム含有率の上昇は認められず、80 ppm 以外は、ほぼ一定した含有率を示した。カルシウムの場合

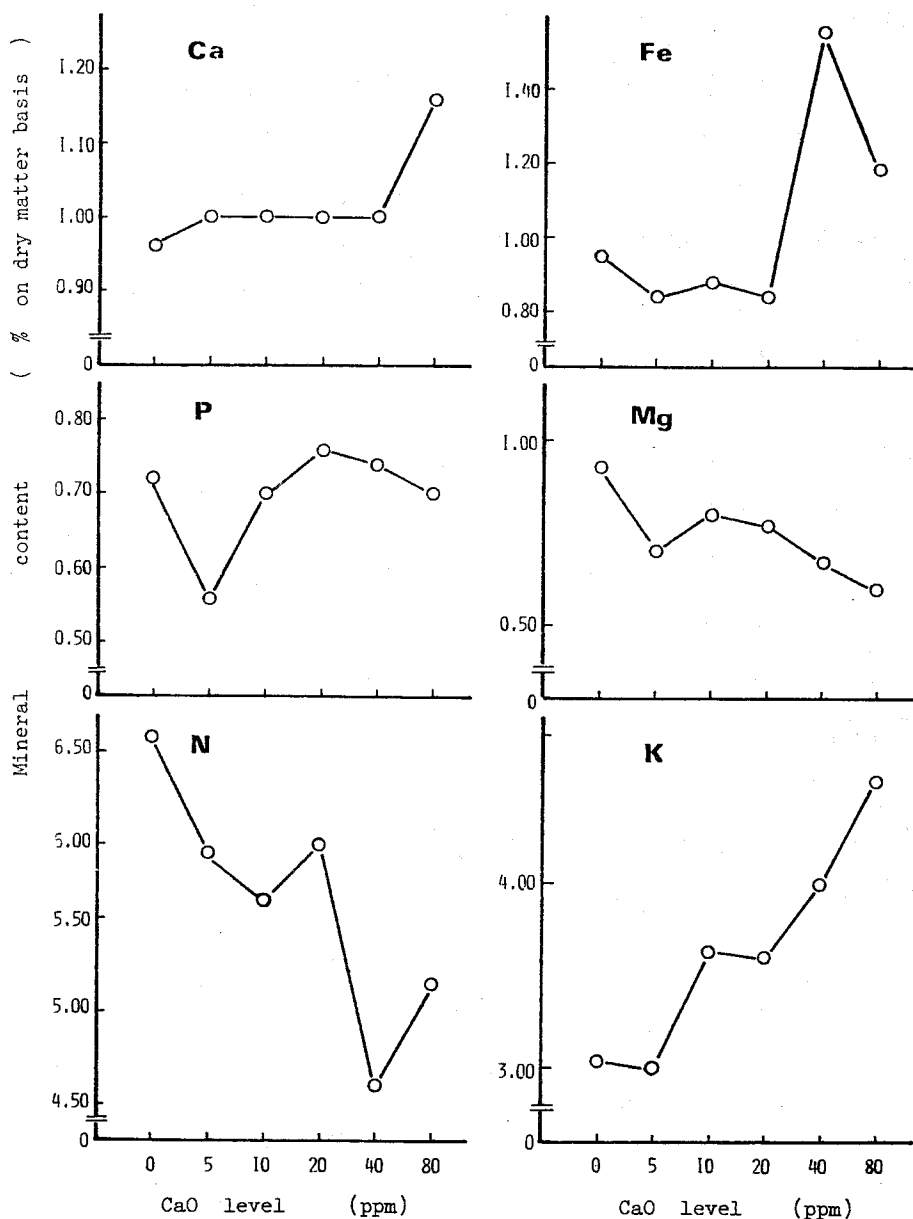


Figure 20. Effect of different calcium levels on mineral content of tops of mother plants.

合は、その吸収が蒸散に伴って行われ、根の養分の選択吸収能力に無関係であるので培養液濃度と含有率との関係が直線的になる<sup>140)</sup>と報告されているが、本実験では異なった。しかし、ホテイアオイの場合は、カルシウム高濃度で根部のカルシウム含量が増加することが認められているので、<sup>146)</sup>根部の分析結果を考慮する必要がある。他の成分では濃度上昇と共に含有率の上昇が認められ

たのはカリウムで、減少したのは窒素とマグネシウムであった。リンについては、5ppmを除いて変動が少なかった。この中で、特に窒素含有率とカルシウム含有率との関係については、多々報告があるが、<sup>11, 37, 99)</sup> 本実験では Newton<sup>74)</sup> の報告と同じく一定の関係が認められなかった。

本章の結果より、ホテイアオイの生育と繁殖は窒素及びリンの影響が大きいことが再認識され、生活排水や畜産汚水による水の富栄養化との関連性が強いことが推察された。

一方、カルシウムにおいては、欠乏症状は非常に明らかに認められたが、実際の繁茂地では問題とならない要素である。

以上より、ホテイアオイを防除する際には、単に物理的な除去を考える以前に、抜本的に水質管理を改善し、窒素やリン濃度を減少させ、富栄養化を防止する必要性が示唆された。

## 第4節 摘 要

1. 本研究は、ホテイアオイの生育及び繁殖と水中の栄養塩との関係を把握する目的で行ったものである。

2. 要素欠除試験から、-N区、-P区、-Ca区で顕著な生育阻害が認められ、阻害された植物体では共通して茎葉部のリン含有率が低いことが明らかになった。

3. 好適窒素濃度 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) は、成株の生長と繁殖において異なり、また、植物体の齢によっても異なった。すなわち、成株の生育は20ppm以上で良好で、160ppmで最大となったが、子株形成及び幼株の生育量は40ppmで最大となった。

4. pH7で最も生育が良く、窒素 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 濃度20ppmの場合は160ppmと比較して、好適pHの範囲が広がった。

5. アンモニア態区及びアンモニア態と硝酸態の混合区は、中性から塩基性側で、硝酸態は酸性側で生育良好であった。各窒素形態間及びpH間で無機成分含有率の増減が大きく影響されるのは、アンモニア態区であった。

6. リン ( $P_2O_5$ ) 濃度 20 ppm 以上で生育促進が顕著で、リンの供給増加と共に著しい茎葉部のリン含有率増加が認められた。

7. カルシウム ( $CaO$ ) 濃度 5 ppm が生育阻害を生じる最低限界濃度であった。カルシウム供給増加に伴う茎葉部のカルシウム含有率増加は認められなかった。

## 第2章 温度と生育及び繁殖との関係

第1章では水中の栄養塩がホテイアオイの生育及び繁殖に及ぼす影響を明らかにした。しかしながら、前章の研究は主に夏期に実施したが温度要因を考慮せずに行った。その結果、水中の栄養塩が同一条件下でも温度により生育反応が異なることが認められ、温度が本草の生長の主要な制御要因の一つであることが示唆された。一般に、生長の最適温度と生長がおこる温度範囲は種によって違っただけでなく、同種でも生態型によっても異なる<sup>130)</sup>ことから、熱帯原産の本草が温帯地域に侵入して、どのような反応を示しているのか把握することは必要と考えられる。

さらに、我が国においてはホテイアオイの越冬に関する知見が重要な意味を持つにも拘らず、本草が生存可能な最低限界温度や低温あるいは凍結に対する抵抗性を明らかにするに、いまだ至っていない。

以上の観点から、本章では、植物体の齢により生育反応が異なることも考慮して、成株と実生株の各々の場合に対する温度と生育及び繁殖との関係、さらに低温に対する反応を解明する目的で行った。

### 第1節 実生株の生育特性

本節では、まず、温度と実生株の生育特性との関係を調べる為に、発芽、初期生育期及び栄養・生殖成長期とステージを追って、その関係を検討した。

#### 1. 発芽及び初期生育期の場合

##### (1) 実験材料及び方法

1978年京都で採取し、5℃湿潤状態で貯蔵しておいた種子を供試し、1979年7月13日に水深2cmと8cmの2処理区を設けたシードリングケースに播種した。1処理区30粒4反復とし、ファイトトン内（自然光）の15℃、20℃、25℃及び30℃の各恒温室に上記のケースを設置して発芽の様子を観察した。

次に、初期生育を調査する目的で発芽不斉一を避ける為に、前述の実験設定

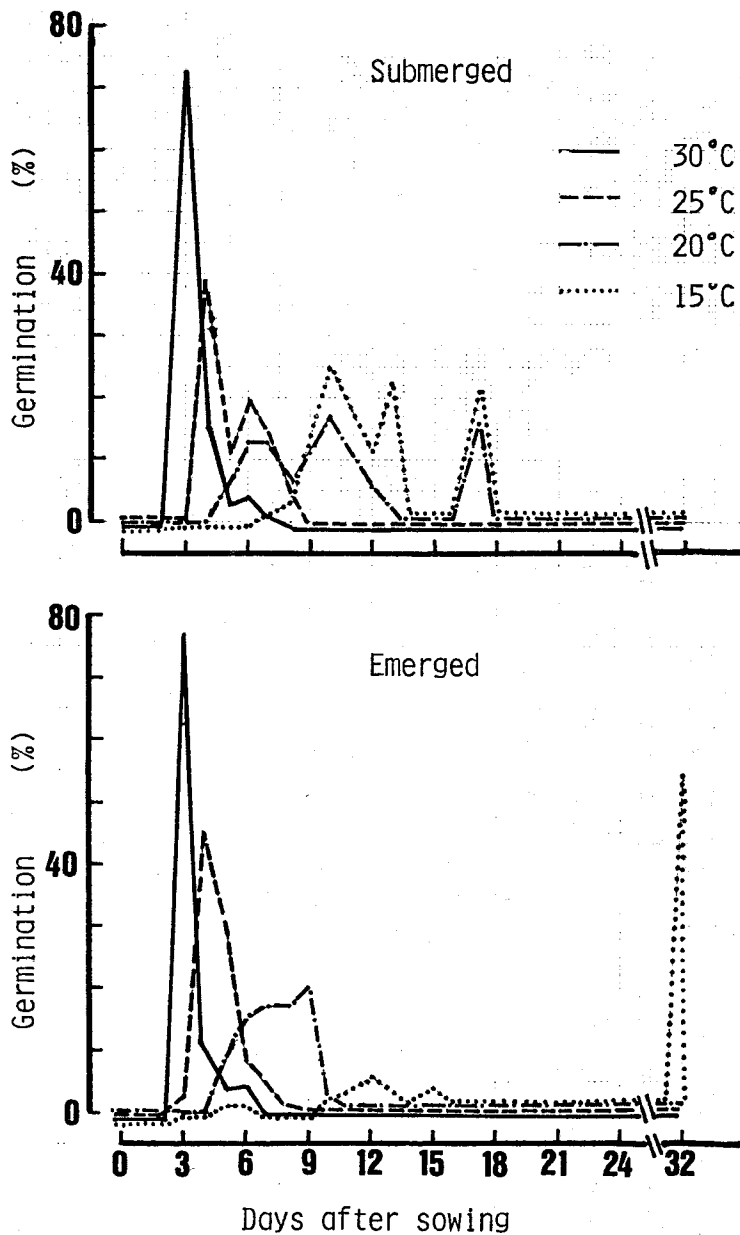


Figure 21. Change with passage of time in percentage germination under different temperatures.

で、あらたに、置床以前に発芽させて2日経過した種子を供試した。その後、1週間毎に葉数と新鮮重を測定し、4週間育成した。

## (2) 実験結果及び考察

発芽の様相をFig. 21に示した。それによると水深2 cm区（抽水区）は比較

的一斉に発芽したのに対し、水深 8 cm 区（沈水区）は発芽不斉一で、その傾向は温度が低くなるのに伴い大きくなった。また、水深 2 cm 区では 30℃で 置床 3 日後に一斉発芽を示したが、15℃では 1 ヶ月以上要した。なお、最終の累積発芽率は、水深 2 cm 区と水深 8 cm 区とでは有意差が無かったが、温度条件による有意差は生じた。すなわち、30℃で 95%、25℃で 89~91%の累積発芽率を示し、他の温度条件より有意に高かった。

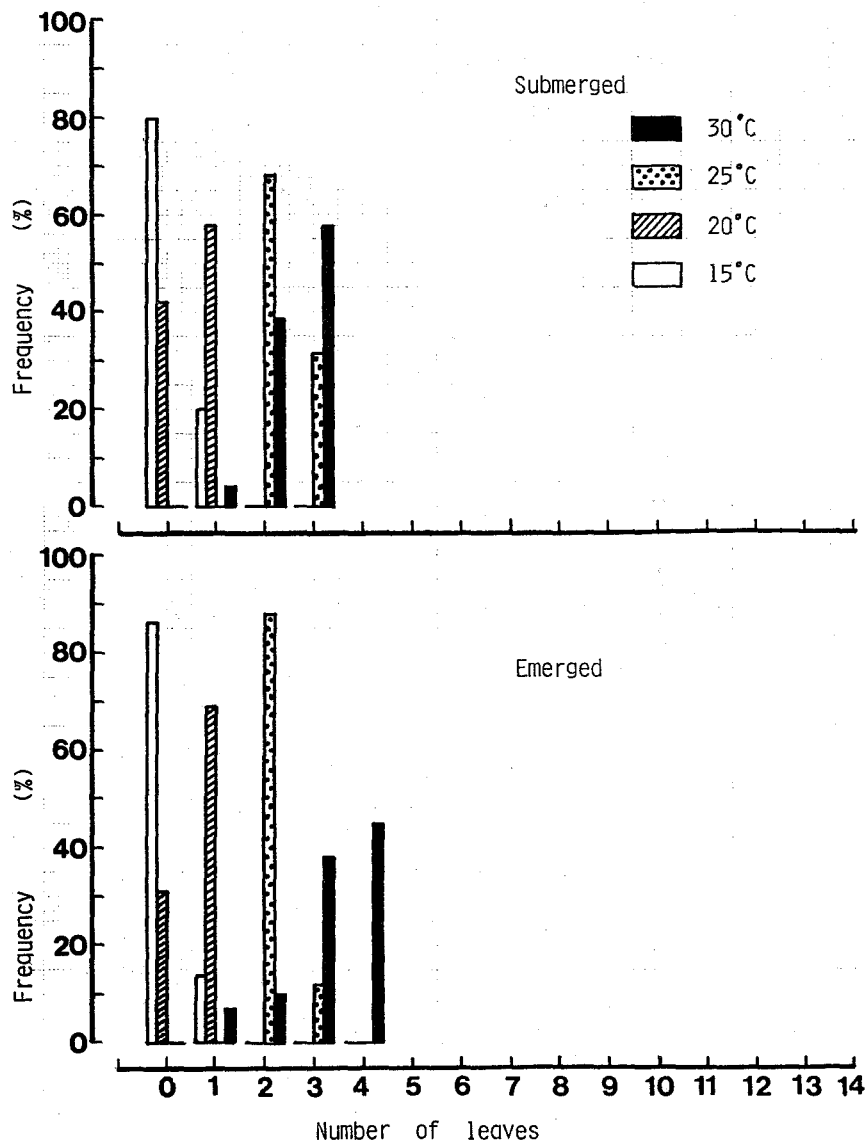


Figure 22-1. The frequency distribution of the number of seedlings by stage during early growth period (1 week after treatment).

次に、初期生育に対する温度の反応を把握する為に初期生育期間中における個体数の葉数別頻度分布を図示した。Fig.22-1は置床1週間後の様相であるが、15℃では、まだ子葉のみであるが、30℃では4葉期にまで進んでいる。沈水区と抽水区間の生育差は、この段階では認められなかった。ところが、置床2週間を経ると、Fig.22-2で明らかなように、30℃及び25℃の抽水区が沈水区のそれより生育ステージが進んでいるのが認められた。3週間後には、Fig.

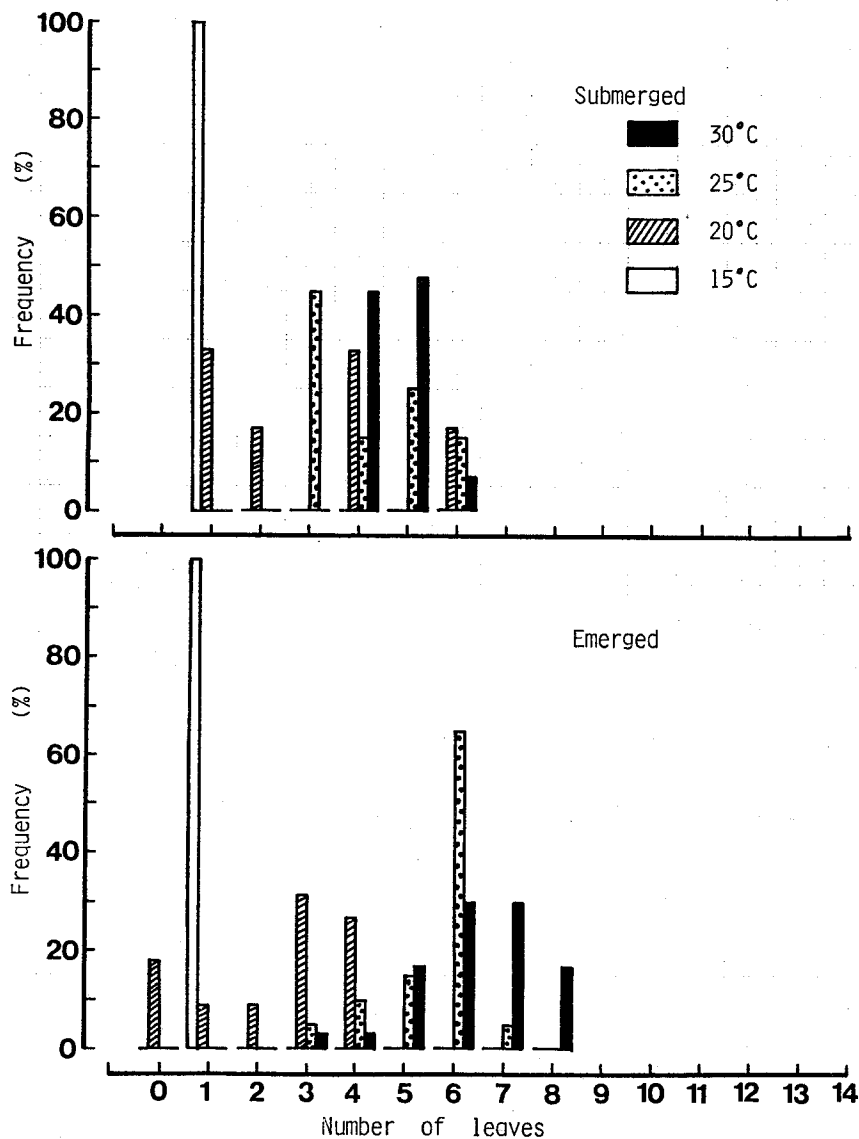


Figure 22-2. The frequency distribution of the number of seedlings by stage during early growth period (2 weeks after treatment).



22-3 に示したように、15℃～30℃まで、すべての温度条件下で抽水区が沈水区より生育が優れていることが明確に現われてきた。さらに、この頃になると、抽水区の30℃で生育速度に個体差が生じ始めている。最後に、Fig.22-4 に4週間後の頻度分布を示したが、3週間後に現われ始めた抽水区での生育速度の個体差が、すべての温度条件下に認められた。

ところで、Fig.22-4 の沈水区では30℃より25℃でステージの進んだ個体が

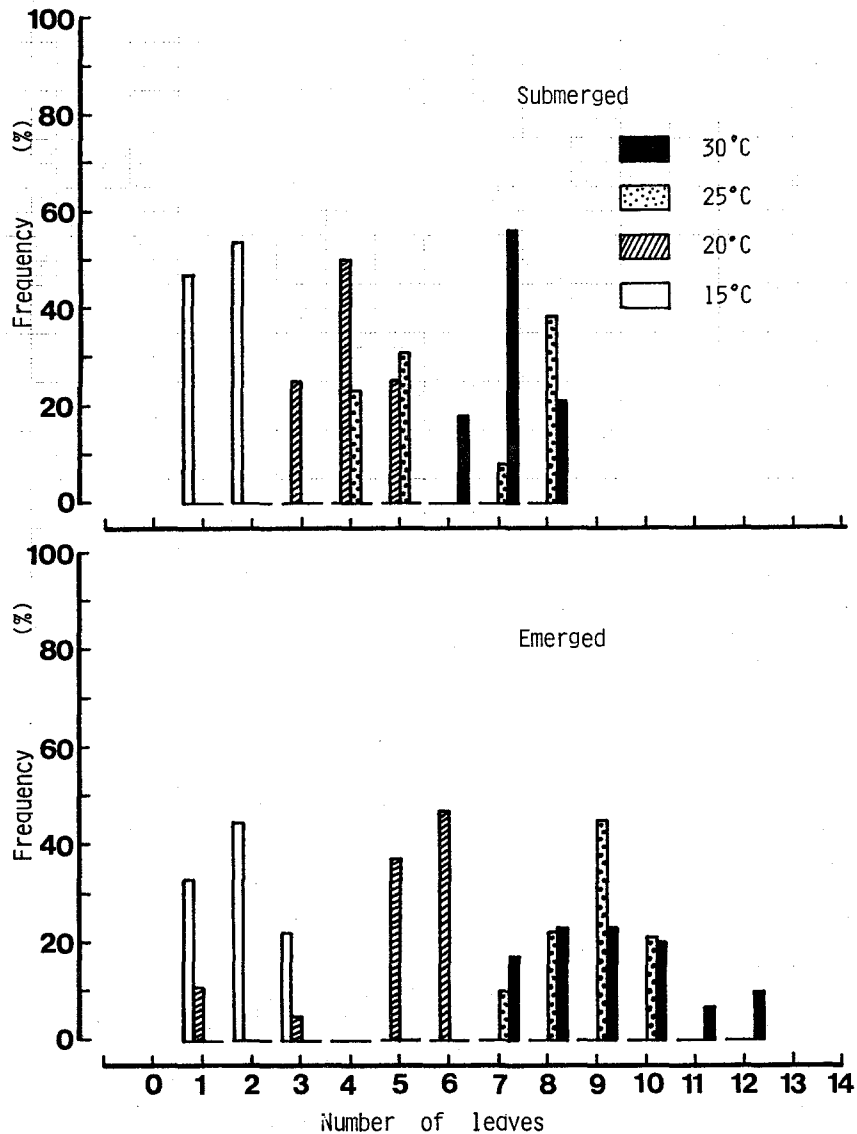


Figure 22-3. The frequency distribution of the number of seedlings by stage early growth period (3 weeks after treatment).

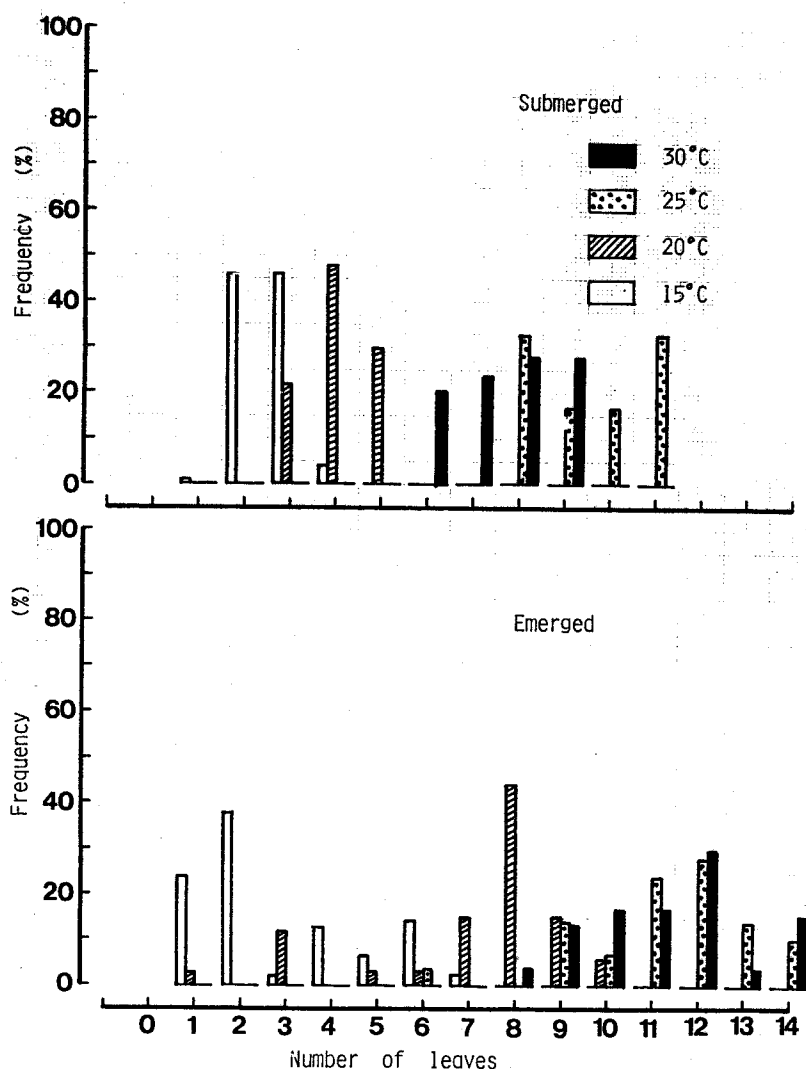


Figure 22-4. The frequency distribution of the number of seedlings by stage during early growth period (4 weeks after treatment).

多いように推察されそうであるが、これは30℃の沈水区では9～10葉期の個体が突然浮上して葉数が減じた状態で浮遊型の個体に変じたことに起因する。すなわち、Fig.23に示したようにStage 1の沈水型であった個体が、初期の葉を2～3枚残して浮上し、Stage 2の様相を示す。土壤中に残された根と葉は、そのまま枯れ、水中根が新しく生じて、Stage 3のように浮遊型となるわけである。

自然状態及び実験室内での発芽ならびに実生の生育に関しては古くから研究

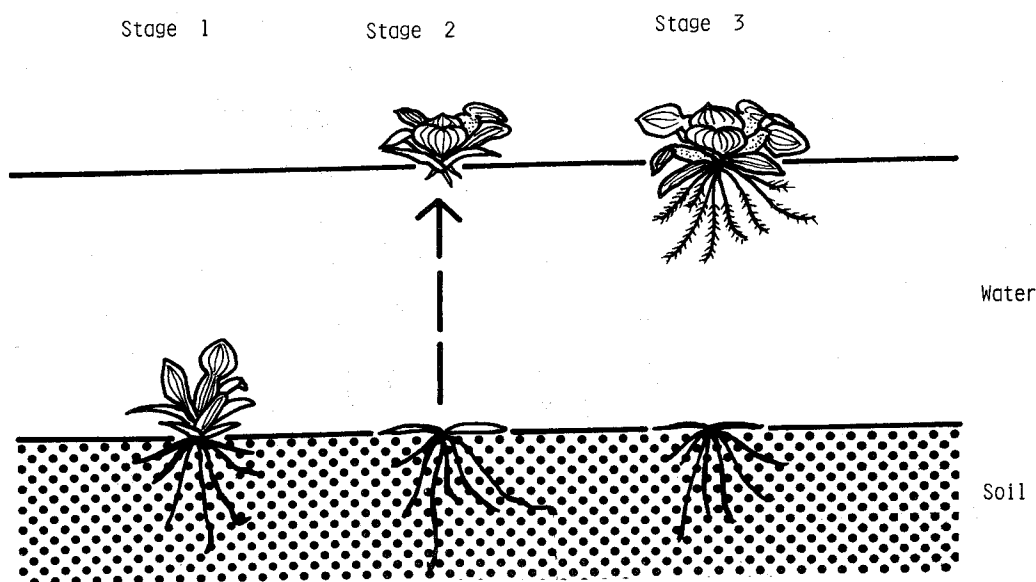


Figure 23. Stages in the growth of waterhyacinth seedlings ( Submerged condition ).

が行われているが、<sup>38, 45, 46, 97, 98, 103, 110</sup>)単に観察だけで済まされている傾向がある。これらの報告から一般に自然状態では水深の浅い地域、水分飽和状態の土壌あるいはホテイアオイの枯死株が腐敗してマット状の堆積物となった場所に実生が多く観察されている。従って、本研究では、水深の異なる発芽床を設けたが、差は生じなかった。水深何cm下まで発芽が可能であるのか、明確にはされていない。<sup>46)</sup>温度要因より光要因や酸素圧が関係するであろう。本研究では30℃が最適発芽温度であったが15℃恒温でも70%以上の発芽率を有し、野外で冬期5℃でも発芽のみ確認されていることから比較的広範囲の温度で発芽が生じると推定される。

また、実生の初期生育であるが、本研究と同様に沈水型より抽水型で生育が良好であることは数多く報告されている。<sup>45, 98)</sup>そして、Fig. 23の様相も多くの研究者が認めている。<sup>45, 97, 98)</sup>しかし、すべての沈水型の株が浮上するとは限らず、また浮上した株が必ず良好な生育を得るとも限らず、さらに詳しい研究が必要である。一方、温度による影響は、2週間以内は明確に15℃から30℃まで差が生じたが、4週間後は25℃と30℃では大差が無くなった。

## 2. 栄養及び生殖生長期の場合

### (1) 実験材料及び方法

本節1の各温度条件下の水深2 cm区で4週間生育させた実生株を、水田土壌を詰めた1万分の1aのワグネルポットに移植し、抽水状態で、その後4ヶ月間、ファイトロン内（自然光）の15℃、20℃、25℃及び30℃の各恒温室内で生育させた。1週間毎に葉数と子株形成数を調査すると共に2週間毎に3ポットずつ取り上げ、新鮮重と乾物重を測定した。

### (2) 実験結果及び考察

#### i) 新鮮重

新鮮重の経時的変化をFig. 24に示した。30℃区の個体の新鮮重を100とした時の比数で各温度区の新鮮重の値を示した。最初の1個体から生じた子株、孫株のすべてを含めた総新鮮重をみると、25℃区では移植後6週間、20℃区では12週間を経ると30℃区に劣らぬ値を示した。それは主に何に起因するのか、親株、子株及び孫株別に検討したところ、25℃区では親株と孫株、20℃区では親株と子株の新鮮重増加によるところが大きいと考えられる。

#### ii) 子株形成数

各温度条件区での子株の形成数をFig.25に示した。それによると、推定最大量、つまりKの値が20℃区で9.14、25℃区で6.54、30℃区で5.85及び15℃区で3.87を示す典型的なロジステック曲線が描けた。20℃区で子株形成数が顕著に多いことが認められたが、Fig.24の新鮮重の増加と比較して検討すると、30℃区では形成された新個体の生育が優先されるのに対して、20℃区では新個体を形成すること、すなわち増殖が優先される傾向があると推察された。このように、温度により繁殖の状況が異なることが認められた。

#### iii) 花梗の形成

最初に植え付けた個体から生じた子株や孫株に形成された花梗数をも含めた全花梗数の形成される様子をFig.26に示した。それによると、30℃区では移植後5週間目（発芽後9週間目）で花梗を有し、25℃区では少し遅れて6週間目、20℃区では13週間目より花梗を有した。15℃区は花芽分化がまったく生じなかった。花梗数の増加は、Fig.26に示す通り指数関数的な増加となり、理論曲線

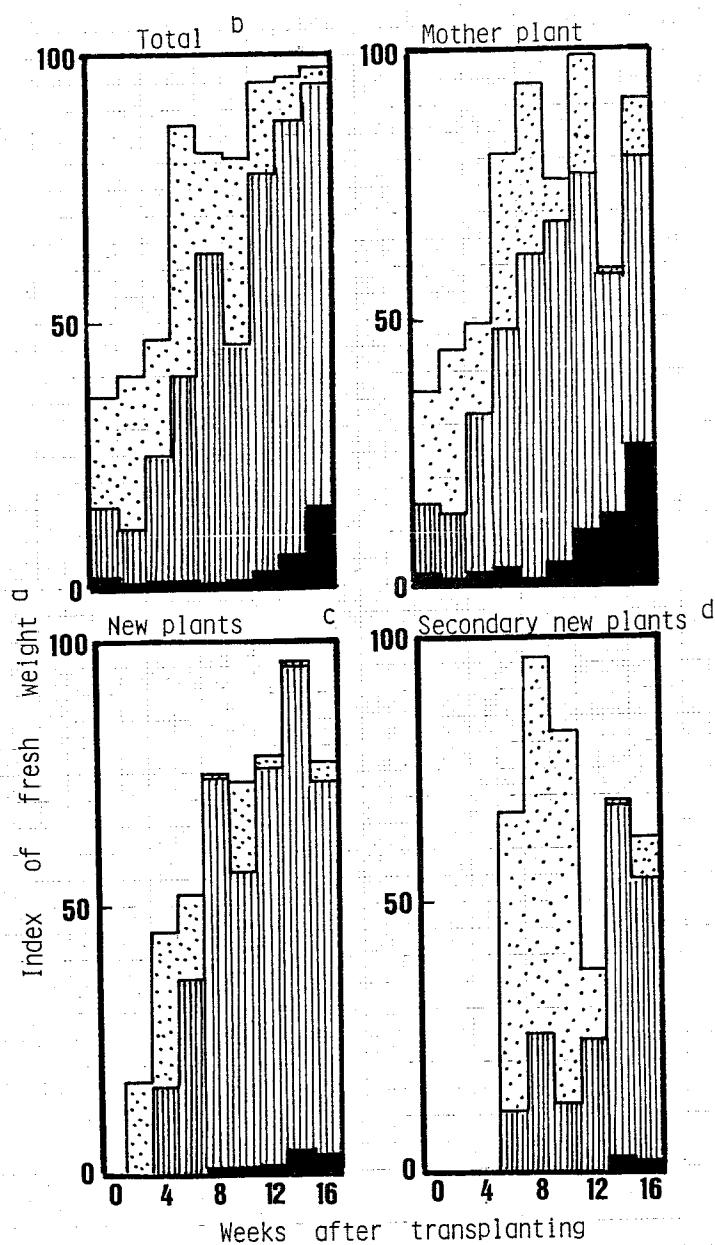


Figure 24. Effect of different temperatures on the growth of waterhyacinth seedlings.

- a: Fresh weight of plants grown at 30°C = 100.
- b: Total weight of plants from one original plant.
- c: Total weight of new plants from one original plant.
- d: Total weight of secondary new plants from one original plant.

: 25°C
  : 20°C
  : 15°C

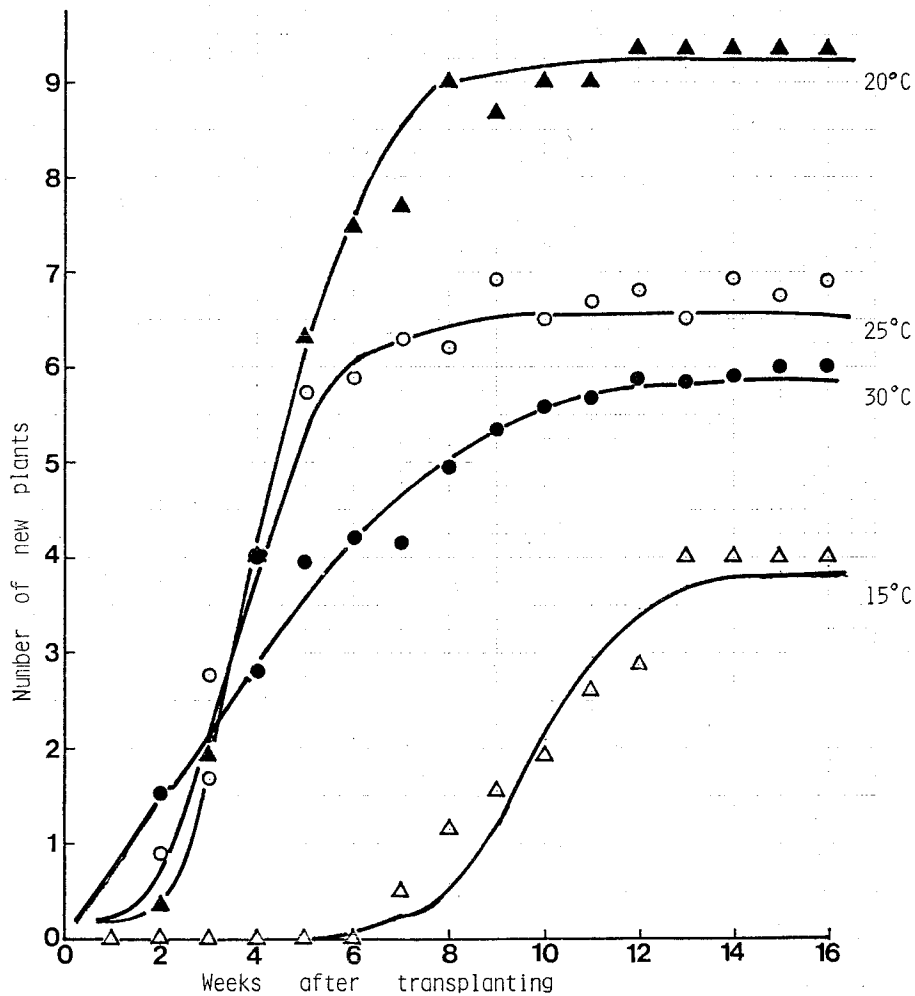


Figure 25. Effect of different temperatures on the number of new plants.

との相関係数も3処理共高かった。

#### iv) 花梗形成と子株形成との相関

ii) 及び iii) の結果から、花梗形成数と子株形成数との相関を調べたFig.27は1個体から形成された子株、孫株のすべてに有した総花梗数と子株形成数との相関を示した。また、Fig.28は、さらに関係を明確に把握する為、最初に供試した株、つまり親株について花梗数と子株数との相関を表わした。両図共、指数関数的な回帰曲線が描かれ、その相関も高く、1%で有意であった。ただ25°C区のみ、相関が無かった。30°C区では、子株が4個前後形成された頃から、

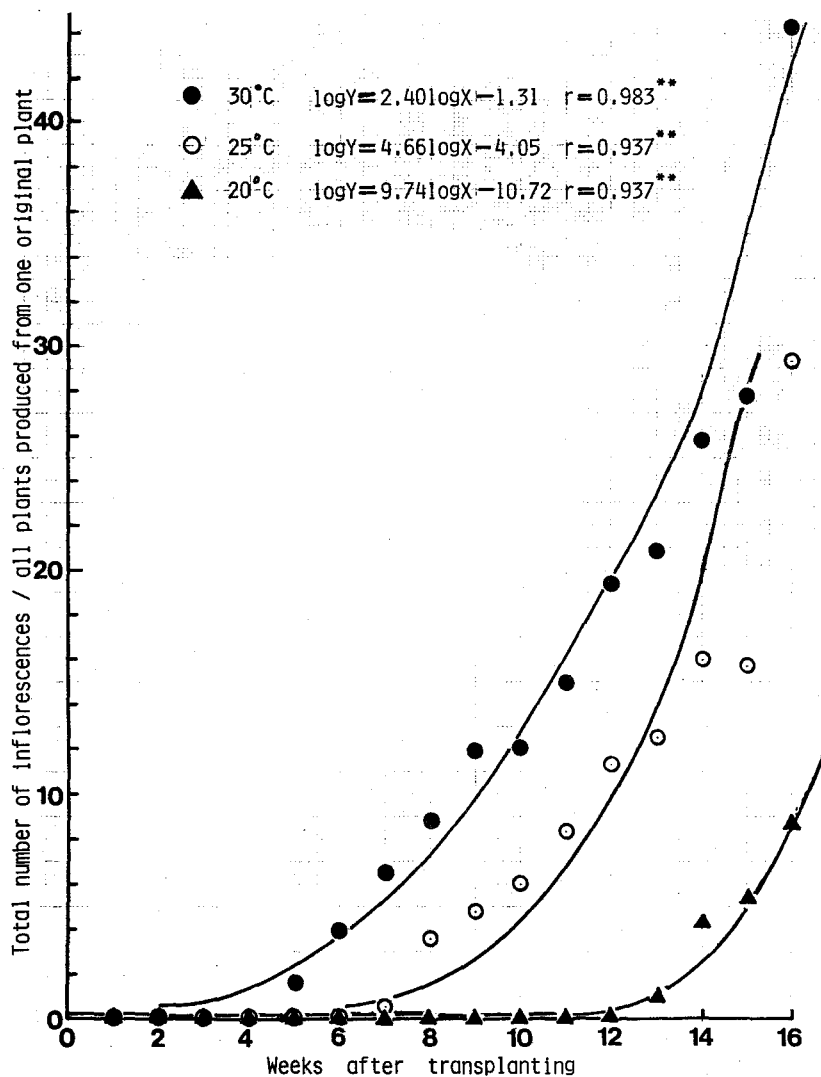


Figure 26. Effect of different temperatures on the number of inflorescences.

25℃区では6個前後、20℃区で9個前後形成されると、花芽形成へと質的変換が起きることが認められた。

以上の結果を実際の繁茂地にあてはめて考えると、生育盛期の過ぎた10月下旬から11月頃に、小さな子株が数多く形成される状態が観察されるが、これは、本研究での20℃区の生育特性に準じるものと推察される。この子株形成促進が、越冬する場合の有利な条件となっているのか否か、植物体の耐寒性を検討する

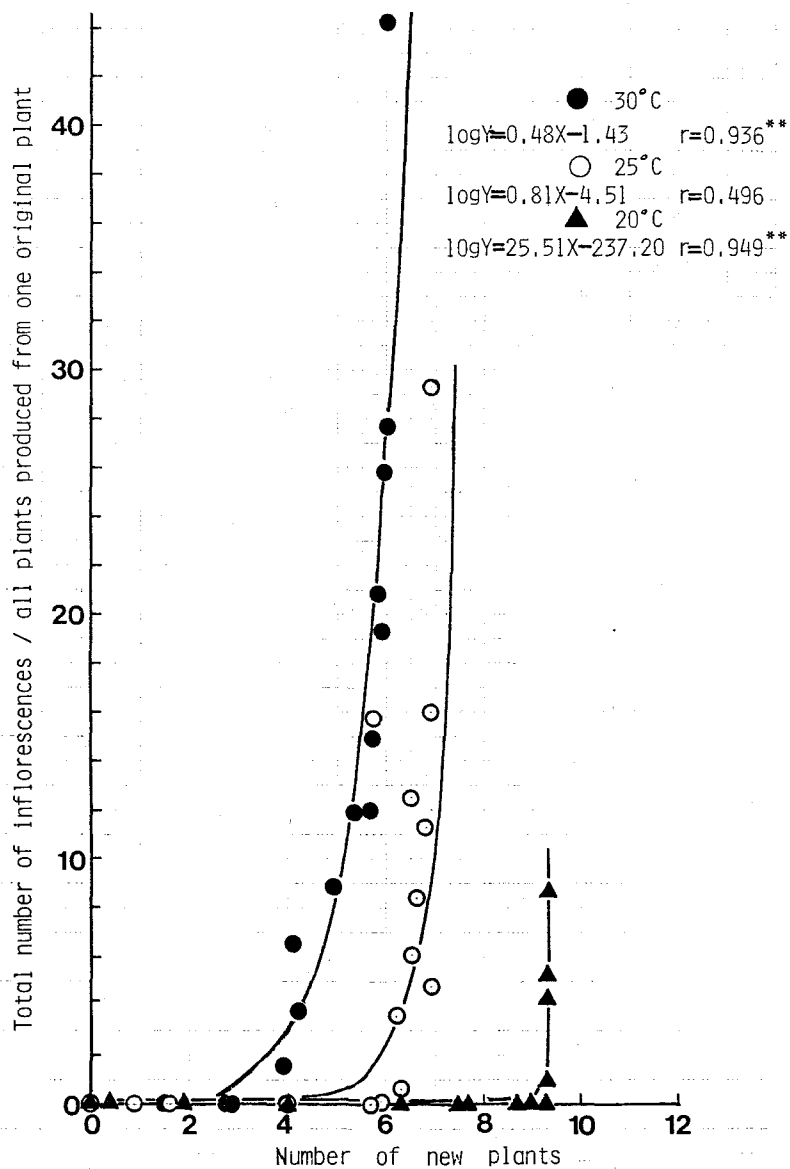


Figure 27. The relation between the number of new plants and the number of inflorescences.

必要が生じてくる。一方、花梗の形成に関しては、いまだ不明な点が多く、繁茂地においても花梗が形成されにくい群落があったり、開花期が非常に遅い群落があったり、いまだ花芽形成のひき金となる要因が解明されていない。温度、日長、日射量及び降雨などとの関係は認められないとの報告もあり、<sup>2)</sup>今後の究明が待たれる。



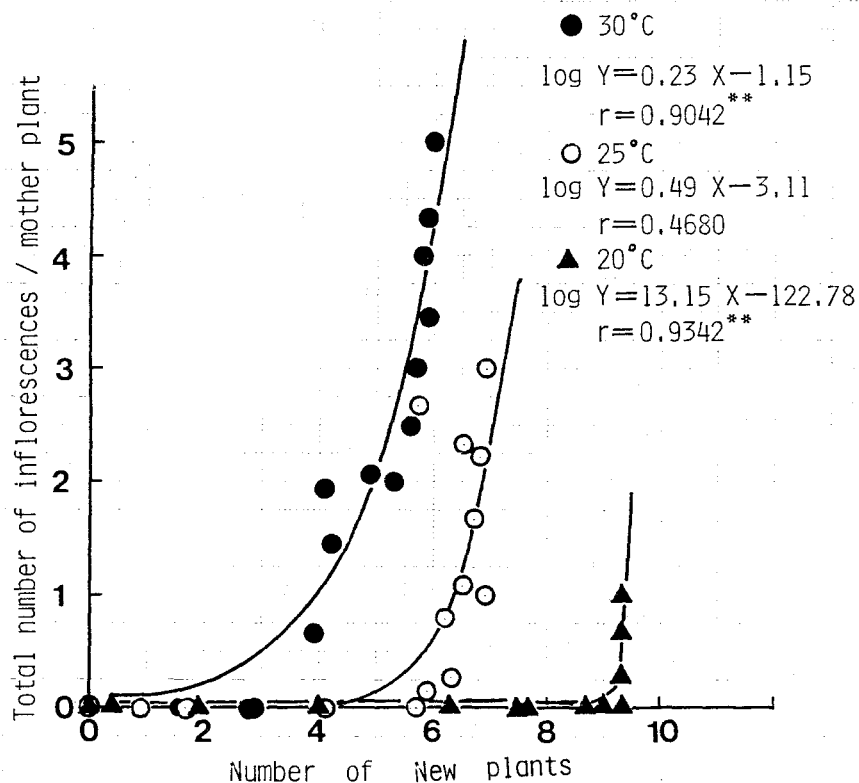


Figure 28. The relation between the number of new plants and the number of inflorescences of mother plant.

## 第2節 成株の生育特性

前節では実生株の温度に対する生育反応を論じ、15℃～30℃の範囲では温度が上昇するのに伴い生育が促進される傾向があったが、30℃と20℃では子株形成数が有意に異なり20℃で促進された。また、花梗は20℃以上で形成され温度が高いほど形成時期が早く、数も多かった。従って、本節では以上の傾向が成株にも共通する特性であるのか検討を行った。

### 1. 実験材料及び方法

ファイトトロン内（自然光）の15℃、20℃、25℃及び30℃の各恒温室に34cm（L）×54cm（W）×15cm（H）の水槽4個を設置し、各水槽に平均新鮮重32g、葉数4～6枚、平均草高21cmの成株4株を供試した。実験は5月13日

より2ヶ月間実施し、液更新は7日毎とし、化学肥料（N，P，K共4 ppm）を投入した。調査項目は、葉数、草高、子株数、花梗数、新鮮重で1週間毎に調査し、2週間毎に各温度設定区に付き4株ずつ引き上げ乾物重を測定した。

## 2. 実験結果及び考察

### (1) 増殖

実験期間中に各処理区で1個体から形成された子株、孫株その他すべての新形成株の総数の経時的变化をFig.29に示した。それによると実験開始後4週間

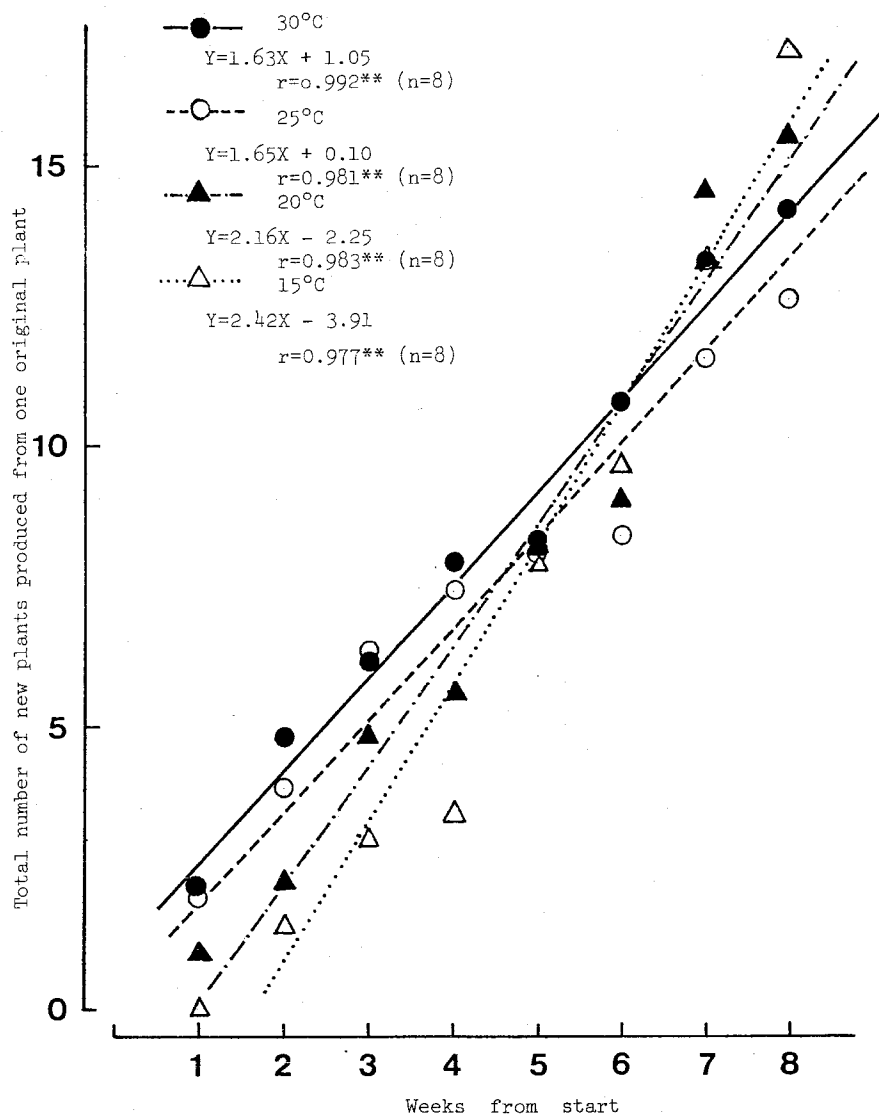


Figure 29. Effect of different temperatures on total number of new plants produced from one original plant.

までは30℃及び25℃で形成数が多かったが、5週間以降は15℃及び20℃の方が多くなった。実験終了時には、有意差は無かったが、15℃区が最も多く、前節の実生株で認められた傾向が成株にも確認された。なお、各処理区共、育成期間が短かったので直線的な増加を示し、直線回帰式で表現することが可能であった。

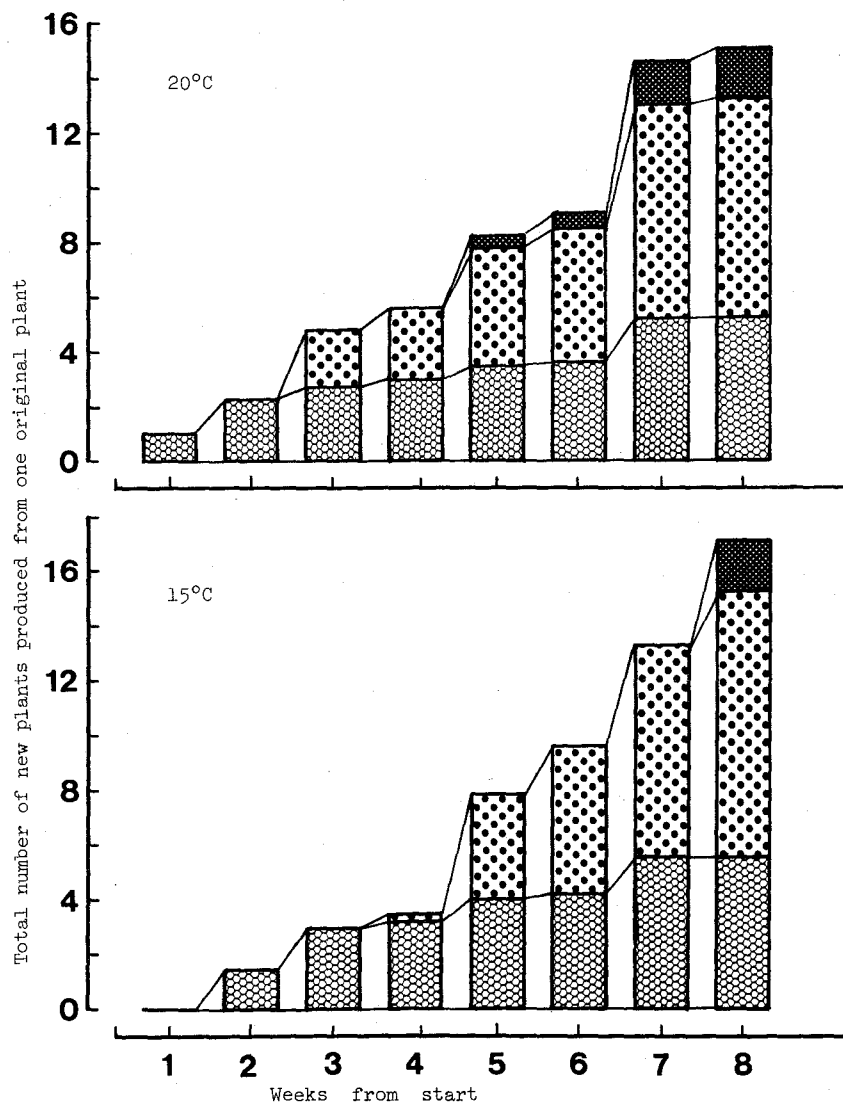


Figure 30-1. Increases of total number of new plants produced from one original plant at 15°C and 20°C. : New plant, : Secondary new plant, : Third new plant.

また、形成株の増加の様相が各処理区でどのように異なるのかFig.30-1及びFig.30-2により検討した。15℃区では他の区と比較して初期の子株の形成速度は非常に遅く、また孫株の形成も4週目で始まり、その後の増加は主に孫株に依存した。一方、25℃及び30℃区では、4週目に既に會孫株が存在しており、さらに30℃区は6週目から會孫株に新しい株が形成された。低温区と高温区とのこれらの差は、ストロンの影響も考えられる。すなわち、低温区ではス

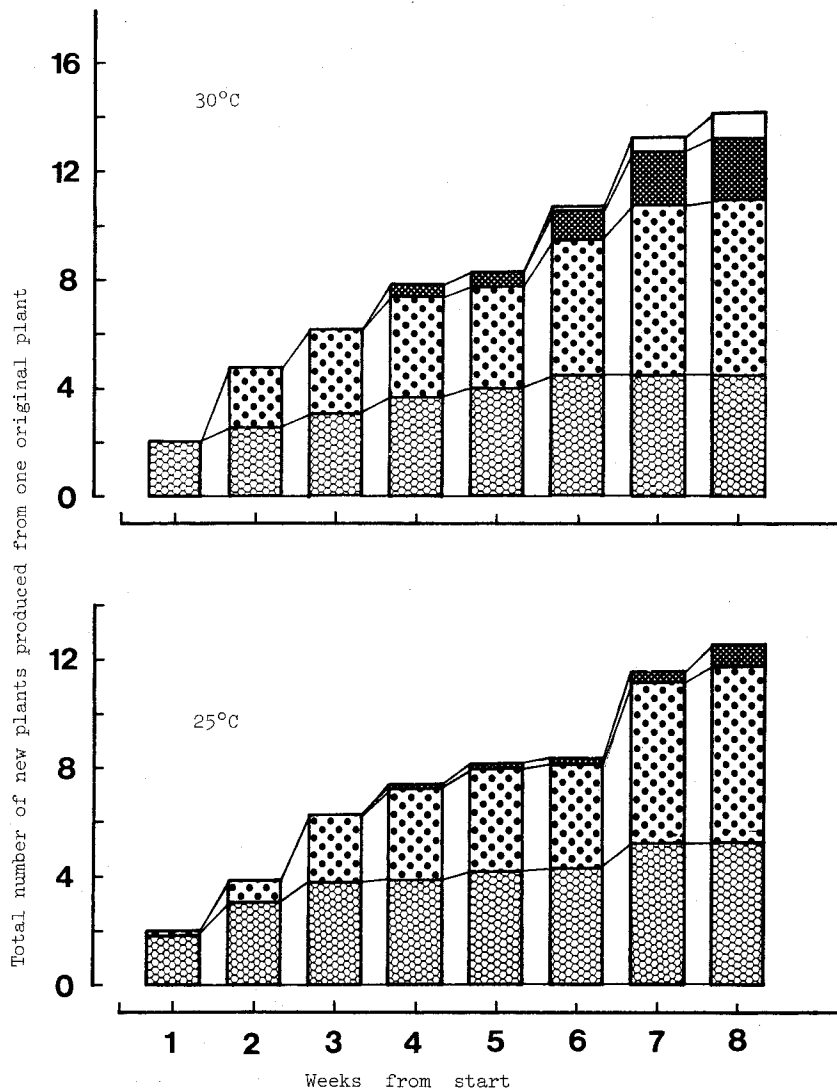


Figure 30-2. Increases of total number of new plants produced from one original plant at 25°C and 30°C. : New plant, : Secondary new plant, : Third new plant, : Forth new plant.

トロンが太く短かいので親株から離れる率が低い、高温区ではストロンが切れ易いので切れた株から新しい株が形成され易いとも考えられる。

## (2) 草 高

一般に、植物は低温に遭遇すると矮小化する傾向がある。<sup>30)</sup> 実生株の20℃区で認められたその傾向が本実験でも確認された。親株では15℃区で実験開始後2週間で草高が50%減じ、終了時には30%以上に矮小化した。Table 6は各温度設定区で新しく形成された子株の平均草高の経時的变化を表示したものである。各処理区間は1%水準で有意であった。15℃及び20℃区は(1)の結果より形成株数は多かったが顕著に小型化した株であったことが明らかになった。

Table 6. Effect of different temperatures on plant height of new plants.

| Treatment | Average of plant height ( cm ) |         |        |        |        |        |        |        |
|-----------|--------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | Weeks from start               |         |        |        |        |        |        |        |
|           | 1                              | 2       | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
| 15℃       | 0.0 a                          | 3.9 a   | 5.3 a  | 4.7 a  | 5.9 a  | 6.0 a  | 6.0 a  | 6.0 a  |
| 20℃       | 4.1 b                          | 8.1 b   | 9.2 b  | 9.3 b  | 9.5 b  | 9.6 b  | 9.6 b  | 9.8 b  |
| 25℃       | 5.5 b                          | 10.6 bc | 13.1 c | 14.1 c | 14.4 c | 15.1 c | 16.8 c | 16.8 c |
| 30℃       | 10.7 c                         | 13.2 c  | 17.5 d | 18.9 d | 19.2 d | 19.3 d | 20.3 d | 22.3 d |

Values in a column followed by the same letter are not significantly different at  $P=0.01$  by Duncan's Multiple Range Test.

## (3) 乾物重

1個体から生じた形成株すべての乾物重の経時的变化と親株、新形成株別に総乾物重に寄与する割合をTable 7に表わした。各処理区間の総乾物重は5%水準で有意であった。経時的にみると、実験開始2週間後は15℃区のみ有意に生長量が劣っていたが、その後は25℃及び30℃区が有意に他の2区より生育が促進された。25℃区と30℃区の生長量の差は認められなかったが親株、新形成株別に増加の様相を把握すると30℃区では親株の生育が悪く、孫株及び曾孫株の生長にエネルギーが分配されている。一方、25℃区は8週目では低温2区に劣ったが、親株の生育は常に良好であった。以上より、ホテイアオイの最適生育温度範囲は25℃～30℃と推察されたが、恒温条件で行った実験であるので30℃区では継続的に生長が促進された為、徒長の徴候が表われていた。植物は夜

温を昼温より下げると生長が促進される種が多いが、ホテイアオイの場合も温度の日変化が生長に及ぼす影響が無視できないので、今後、究明する必要がある。

Table 7. Effect of different temperatures on the growth of waterhyacinth.

| Weeks from start | Treatment | Average of dry weight of all plants produced from one original plant (g) |            |                     |                 |                 |                          |
|------------------|-----------|--|------------|---------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
|                  |           | Mother plant   | New plant  | Secondary new plant | Third new plant | Forth new plant | Total                    |
| 2                | 15°C      | 2.28±0.35  | 0.03±0.02  |                     |                 |                 | 2.30±0.32 a <sup>b</sup> |
|                  | 20°C      | 2.38±0.40  | 0.20±0.08  |                     |                 |                 | 2.58±0.41 b              |
|                  | 25°C      | 2.69±0.49  | 0.62±0.27  |                     |                 |                 | 3.31±0.69 b              |
|                  | 30°C      | 2.41±0.33  | 0.91±0.40  | 0.06±0.04           |                 |                 | 4.06±1.28 b              |
| 4                | 15°C      | 4.06±1.19  | 0.89±0.14  |                     |                 |                 | 4.95±1.53 a              |
|                  | 20°C      | 4.96±0.73  | 3.44±0.95  | 0.46±0.30           |                 |                 | 8.87±1.73 b              |
|                  | 25°C      | 6.37±0.99  | 5.54±0.98  | 1.22±0.82           |                 |                 | 13.12±3.26 c             |
|                  | 30°C      | 5.21±1.44  | 6.04±1.03  | 3.62±0.98           | 0.02±0.01       |                 | 14.89±2.34 c             |
| 6                | 15°C      | 6.05±0.47  | 3.41±0.38  | 0.50±0.17           |                 |                 | 9.96±0.98 a              |
|                  | 20°C      | 6.76±1.31  | 6.41±2.02  | 1.79±0.92           |                 |                 | 14.95±3.46 b             |
|                  | 25°C      | 7.14±1.61  | 10.93±1.40 | 1.87±0.26           |                 |                 | 19.94±2.99 c             |
|                  | 30°C      | 5.65±0.99  | 8.63±1.20  | 5.18±1.22           | 0.28±0.03       |                 | 19.74±3.25 c             |
| 8                | 15°C      | 10.32±2.69   | 11.29±1.44 | 4.04±0.65           | 0.15±0.08       |                 | 25.79±4.55 a             |
|                  | 20°C      | 10.39±1.58   | 15.96±4.00 | 9.88±4.13           | 0.59±0.69       |                 | 36.81±8.86 b             |
|                  | 25°C      | 9.96±0.94  | 22.64±3.93 | 14.33±5.76          | 0.03±0.01       |                 | 46.96±4.26 c             |
|                  | 30°C      | 9.19±0.82  | 21.54±3.28 | 14.41±3.86          | 1.82±0.65       | 0.16±0.02       | 47.12±4.56 c             |

a: All values represent Average±S.D.

b: Values in a column followed by the same letter are not significantly different at P=0.05.

#### (4) 花梗の形成

花梗を有しない成株を供試し、各処理区で形成された花梗数の経時的変化を Fig. 31 に図示した。各処理区間で 0.1% 水準で花梗数は有意に異なり、20°C 以下と 25°C 以上では顕著な差が生じた。また、花梗数の増加は指数関数的増加を示し Fig. 31 に示した回帰曲線が得られ、相関係数も高かったが 15°C 区のみ、少し相関が低かった。Fig. 31 から実験開始後 3 週間経た頃から 30°C 区で、4 週間経た頃から 25°C 区で花梗数の増加が明確に認められ始めたが、その現象が、形成されたいずれの株に依存するかを Fig. 31-1 及び Fig. 31-2 に表わした。それによると、両区共、子株に形成された花梗数が関与していることが判明した。30°C 区では 6 週間目から孫株の花梗数も関与している。従って、25°C 区は新株形成数は全区で最も少なかったが、形成された株は乾物重の結果より順調に生育したことが推察され、それに基づいて花梗も形成されたと考えられる。

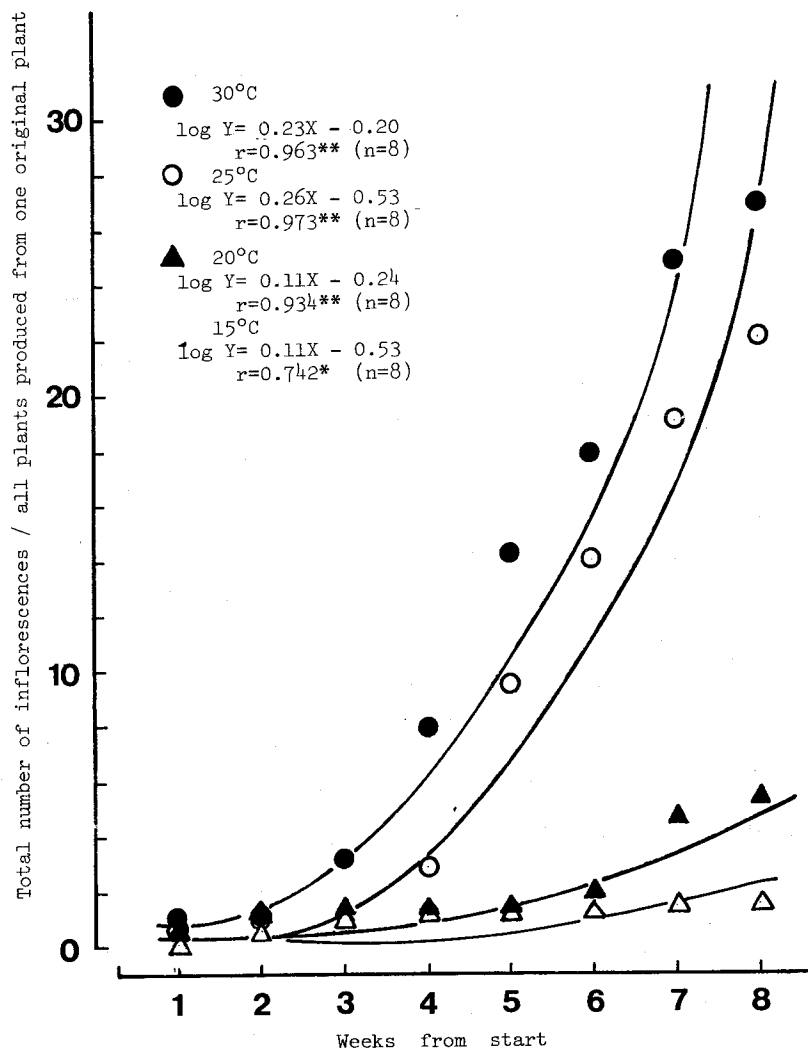


Figure 31. Effect of different temperatures on the number of inflorescences.

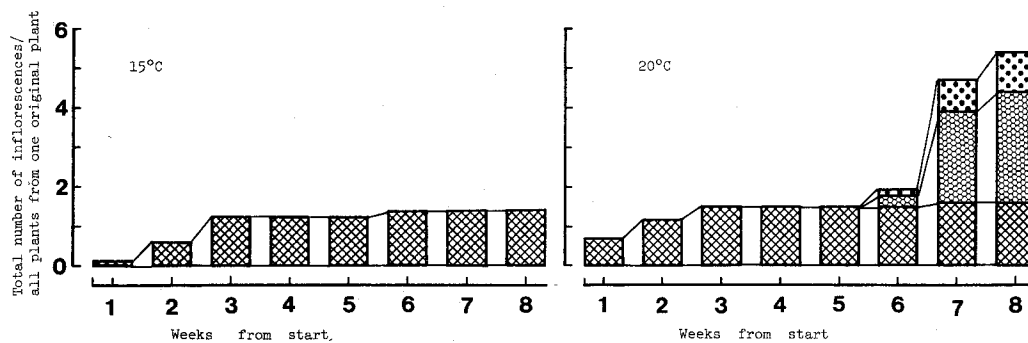


Figure 32-1. Increases of total number of inflorescences per all plants produced from one original plant at 15°C and at 20°C. ■: Mother plant, ■: New plant, ■: Secondary new plant.

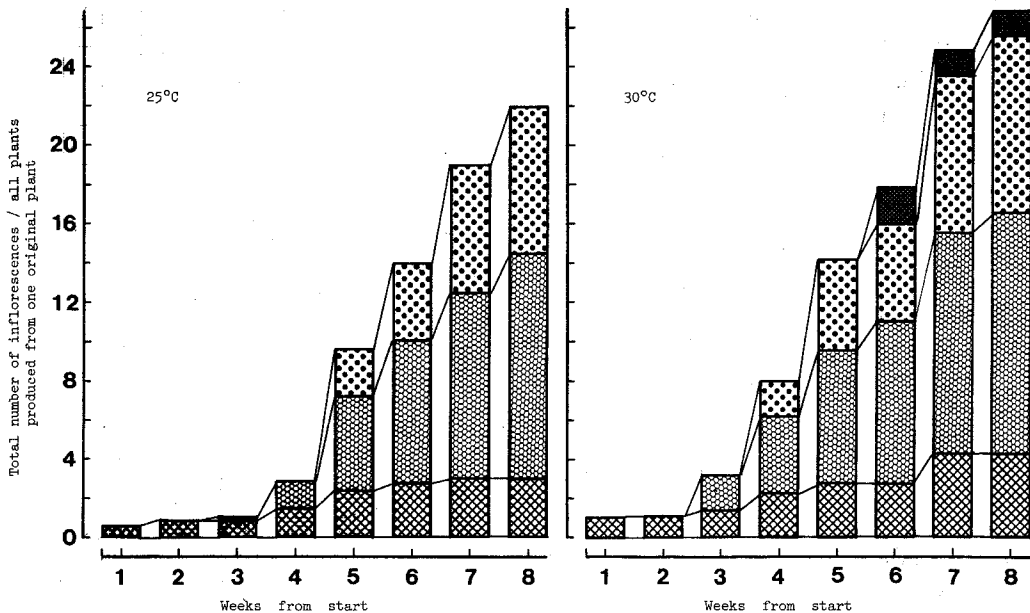


Figure 32-2. Increases of total number of inflorescences per all plants produced from one original plant at 25°C and 30°C. ■ : Mother plant, ▨ : New plant, ▩ : Secondary new plant, ■ : Third new plant.

一方、30°C区は、25°C区に比較して新たに株を形成する速度が速く、また花梗を形成するまでの期間が短かいと推定された。

一方、15°C区及び20°C区は花梗数は主に親株が関与したものである。20°C区では、6週間以降になって、やっと新形成株に花芽分化を認めている。従って、低温区では新形成株の数こそ多かったが、花芽分化のステージに至る株は少なかったと考えられる。以上の結果より、花梗形成には積算温度が大きく関与する可能性が示唆された。

##### (5) 花梗形成と増殖との相関

雑草の特質の一つに短い栄養生長期を送ると、すぐに生殖生長に転化し、栄養生長期と生殖生長期との明確な境界線が無いことがあげられている。<sup>59)</sup> ホテイアオイの場合、実生株では各温度条件区によって異なったが、ある程度の個体が形成された後、生殖生長が始まることが把握された。本研究でも、同様の検討を行い、X軸に1個体から形成された総個体数、Y軸に1個体から形成されたすべての個体に有した総花梗数を表わしてFig. 33を作成した。それによると、各処理区共、指数関数的な回帰曲線が描かれ、相関係数も高く1%水準で有



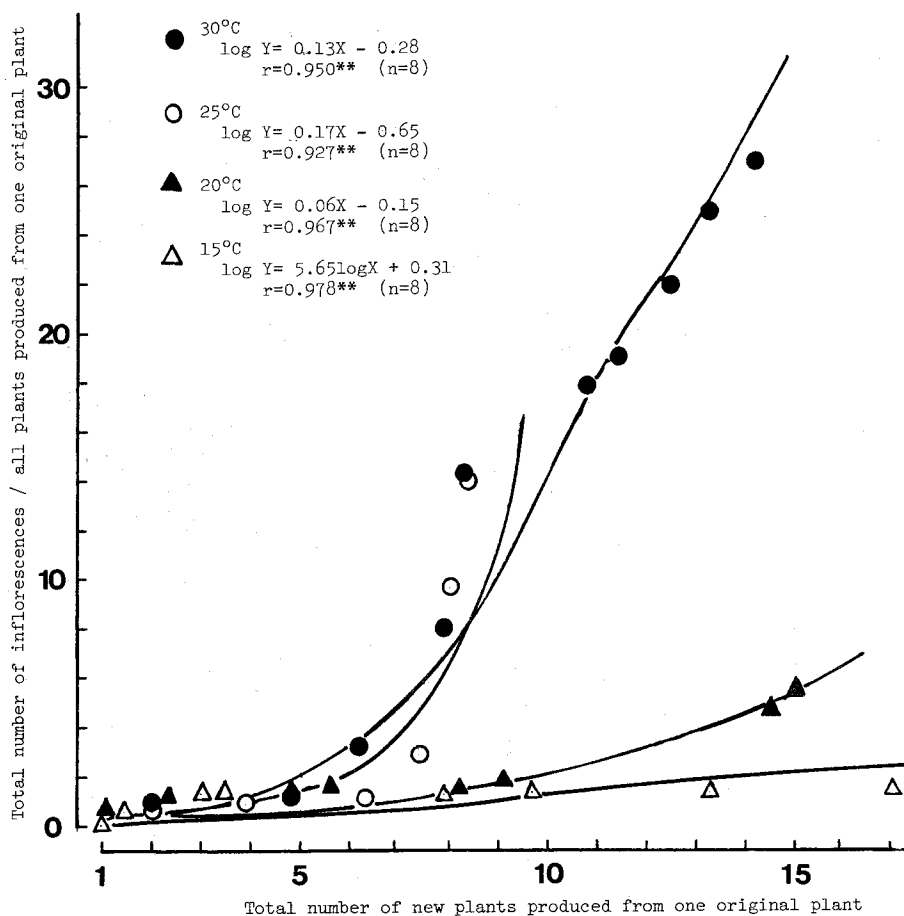


Figure 33. The relation between the number of new plants and the number of inflorescences.

意であった。すなわち、高温区では形成株が6～7個を過ぎた頃から花梗数が顕著に増加したのに比べ、低温区では形成株の増加に対する花梗数の増加のカーブは非常に緩やかであった。

以上の結果を考察すると、実生株と成株の温度に対する生育反応は同じ傾向を示すことが認められ、増殖、生長量及び花芽分化の様相に各温度条件下で特有の型を有することが判明した。

### 第3節 低温に対する生育反応

ホテイアオイは、我が国では、10月頃まで生育と繁殖を続けるが、11月頃霜害を受け葉身の一部が枯れ始め、生育期から生育停止期に変換する。しかし、ライゾーム（生長点の存在する基部）が枯死しない限り植物体は生存する。<sup>151)</sup> 冬期の残存部位や越冬株の有無は地域により、あるいは寒波の程度や回数により異なる。本節では、あまり解明されていない低温に対する生育反応を野外観察を中心に明らかにしようとした。

#### 1. 発生分布域と気温との関連性

##### (1) 調査方法

緒論で述べた各都道府県農業試験場を通して施行したアンケート調査により得たホテイアオイ発生分布地域と理科年表から得た全国の気温との関係を検討した。

##### (2) 調査結果及び考察

ホテイアオイ発生分布地域は、換言すると越冬可能あるいは種子繁殖が可能な地域と考えられる。従って、環境要因の一つである気温と分布北限との関係を検討したところ、Fig. 34, 35および36に示すような結果を得た。すなわち、1月の平均気温1℃、年平均気温13℃及び最寒月（1月または2月）の日最低気温平均値-3℃の等温線と一致した。

しかしながら、緒論で既に述べたが、最近、福島県や長野県で分布が確認されていることから、実際に越冬可能な場合は、気温、水温、水流、風速、その他諸々の複雑な微環境及び温排水流入場所等の人工環境が影響していると推察される。アンケート調査及び現地調査から、越冬株の存在する場合は、冬期結氷せず水温は比較的一定で、流速が遅く、水深も浅く水際に湿生あるいは抽水植物が存在するところと推測されているが詳細は把握されていない。従って、次項では毎年、越冬株の存在する2地域をとりあげて、自然状態での耐冬の様相を論じてみよう。

#### 2. 自然状態における耐寒性

##### (1) 実験材料及び方法

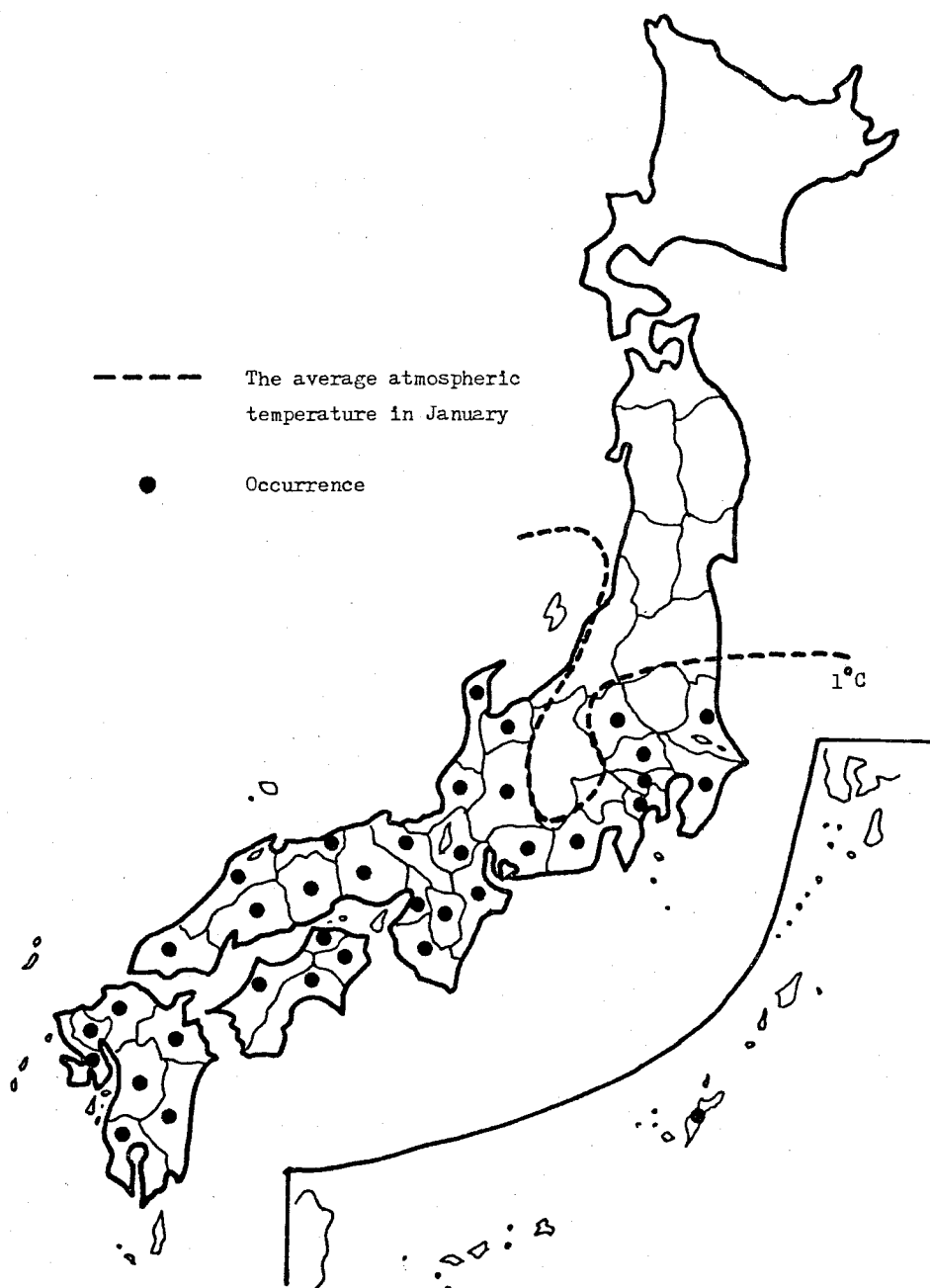


Figure 34. Relation between the distribution and the average atmospheric temperature in January.

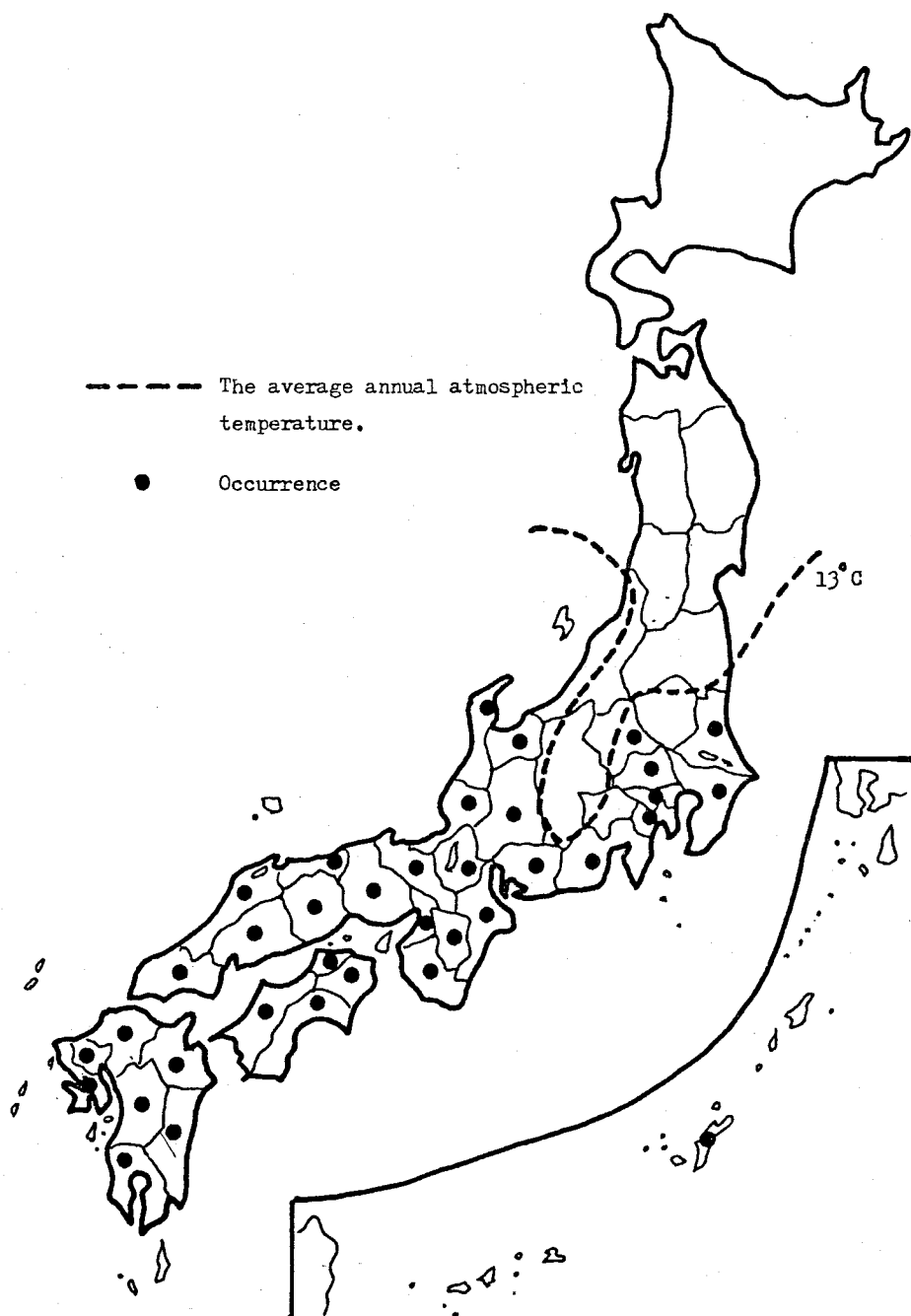


Figure 35. Relation between the distribution and the average annual atmospheric temperature.

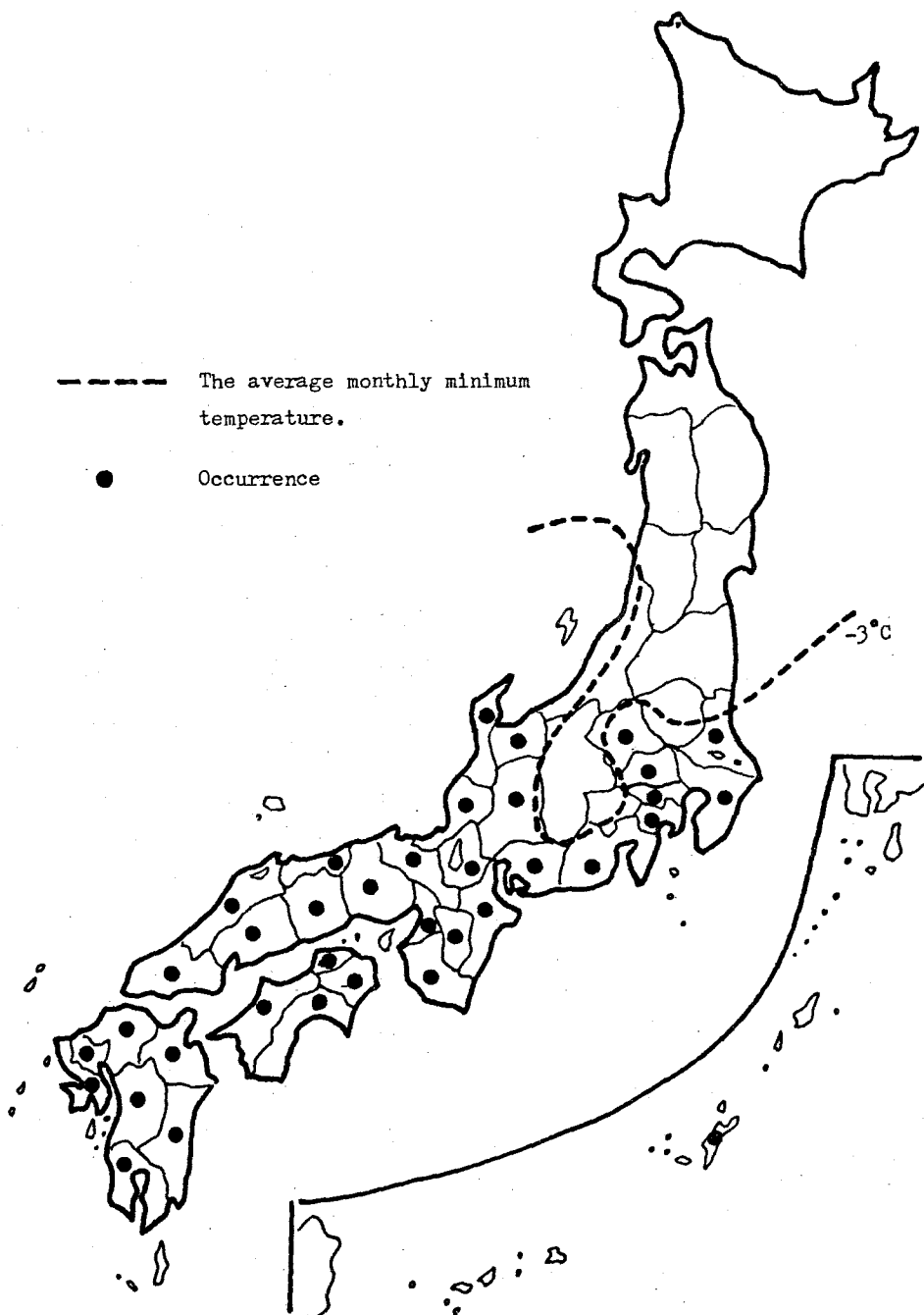


Figure 36. Relation between the distribution and the average monthly minimum temperature.

### Ⅰ) 大阪府南河内郡寺池調査

大阪府南河内郡美原町寺池(約4 ha)は従来から灌漑用溜池として利用されているが、家庭雑排水や工場排水が流入する為に、10数年来ホテイアオイの繁茂がみられ、越冬株も数多く存在するところである。11月26日より月2回、経時的に実害状況、水温とライゾーム内温度(熱電対使用)及びライゾーム内の様相を観察した。また、草高別に(大型株:平均草高50 cm、中型株:平均草高30 cm、小型株:平均草高10 cm)無作為に20株ずつ採取した植物体のライゾームの含水量及び塩化コバルト浸漬法<sup>14)</sup>による結合水の測定を行った。

### Ⅱ) 岡山大学農業生物研究所構内

岡山大学農業生物研究所敷地内に設置した60 cm (L)×60 cm (W)×25 cm (H)のコンクリートポットに葉数13枚、新鮮重約8 g、草高7 cmの実生株を供試した区と、葉数6枚、新鮮重40 g、草高18 cmの成株を供試した区を設け7月20日より定期的に施肥することにより育成した。両区共、被度が100%になり生育盛期が過ぎた後、結水が繰り返され茎葉部が茶褐色に変じた1月8日から1週間毎に2月13日迄、定期的に10株ずつ取りあげ、しばらく5℃恒温下で順化させた後15℃加温の温室内に搬入した。その後、1ヶ月間放置し、再生の様子を観察することにより生死判定を行った。実験は両区共3反復とし、1月8日に供試した株は成株で新鮮重約90 g、草高約27 cm、実生株で新鮮重約30 g、草高約15 cmであった。また、ポット内の水温は水面下5 cmの日最高及び日最低水温を測定した。

## (2) 実験結果及び考察

### Ⅰ) 大阪府南河内郡寺池調査

経時的に茎葉部の寒害程度をTable 8に示した。12月7日迄は葉身部のみ霜害で茶褐色になり乾燥し、小型株より大型株の方が被害が大きかった。その後、葉柄部まで被害が及び、この頃になると草高の低い小型の方が被害が大きかった。Table 8の数字は全茎葉数に対する寒害で傷んだ茎葉数の割合の平均値である。

次に、株の存在する付近の水温を水表面と水表面下5 cmの2点で測定しFig. 37にその温度範囲を示し、併せて熱電対で測定したライゾーム内の温度を表わ

Table 8. Winter injury in waterhyacinth plants at Tera-ike.

|               | Winter injury ( % ) <sup>a</sup> |                |        |      |         |       |         |       |         |       |         |        |
|---------------|----------------------------------|----------------|--------|------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|--------|
|               | Date sampled                     |                |        |      |         |       |         |       |         |       |         |        |
|               | Nov. 26                          |                | Dec. 7 |      | Dec. 21 |       | Jan. 11 |       | Jan. 28 |       | Feb. 15 |        |
|               | L                                | P <sup>b</sup> | L      | P    | L       | P     | L       | P     | L       | P     | L       | P      |
| Large plants  | 16.00                            | 0.00           | 30.51  | 0.00 | 52.46   | 0.00  | 54.62   | 13.60 | 55.28   | 33.61 | 100.00  | 100.00 |
| Medium plants | 10.00                            | 0.00           | 26.32  | 0.00 | 40.80   | 5.00  | 49.50   | 16.80 | 68.26   | 42.80 | 100.00  | 100.00 |
| Small plants  | 8.97                             | 0.00           | 13.90  | 0.00 | 44.00   | 15.00 | 51.80   | 56.00 | 73.40   | 81.60 | 100.00  | 100.00 |

a: Winter injury =  $\frac{\text{No. of injured leaves or petioles}}{\text{No. of total leaves or petioles}} \times 100$

b: L; Leaves, P; Petioles.

した。この池では、温排水流入の影響で水温は極寒期でも常に高く、7℃以上であった。ライゾーム内の温度は水温域の少し高い値に属したが、1月中旬以降、その傾向が乱れた。これは、ライゾームの質的変化が起る時期と一致している。すなわち、大型株のライゾーム中の含水量を測定した結果、Table 9に示す通り、全水分含量は寒さが増すと共に経時的に減少したが、結合水においては1月中旬頃急激に増加、また2月中旬に急激に減少した。耐凍性と結合水（不凍結水）との間には平行関係が認められている<sup>120)</sup>ので、結合水の増加は寒害に対する抵抗性を持った為と推察される。

一方、ライゾームの生存率をTable 10に示したが、やはり1月中旬にて、それまで白色であったライゾームに変化が生じ、赤紫色のアントシアンが形成され始め、小型株は枯死株が認められた。そして、2月中旬に採取した株は、大型、中型、小型共に、すべて枯死していた。Table 9で2月中旬結合水が減少したのは、枯死したことに起因する。低温に遭遇した後、アントシアンが形成されるのは、耐凍性に関与する糖類含量の増加も関係しているかどうか、生理的な側面を追求する必要がある。

結局、この冬は例年になく寒波が厳しかった為、越冬株は数株しか認められず実生株がその夏の繁茂の主流を占めた。厳冬で気温は低下したが、水温は7℃で結氷も起こらない条件下で越冬株がほとんど存在しなかったことは、茎葉部と根部の温度勾配が急激で生理障害を起こしたのか、あるいは寒害に伴う乾燥害が影響を及ぼしたのか、今後の検討を要する。

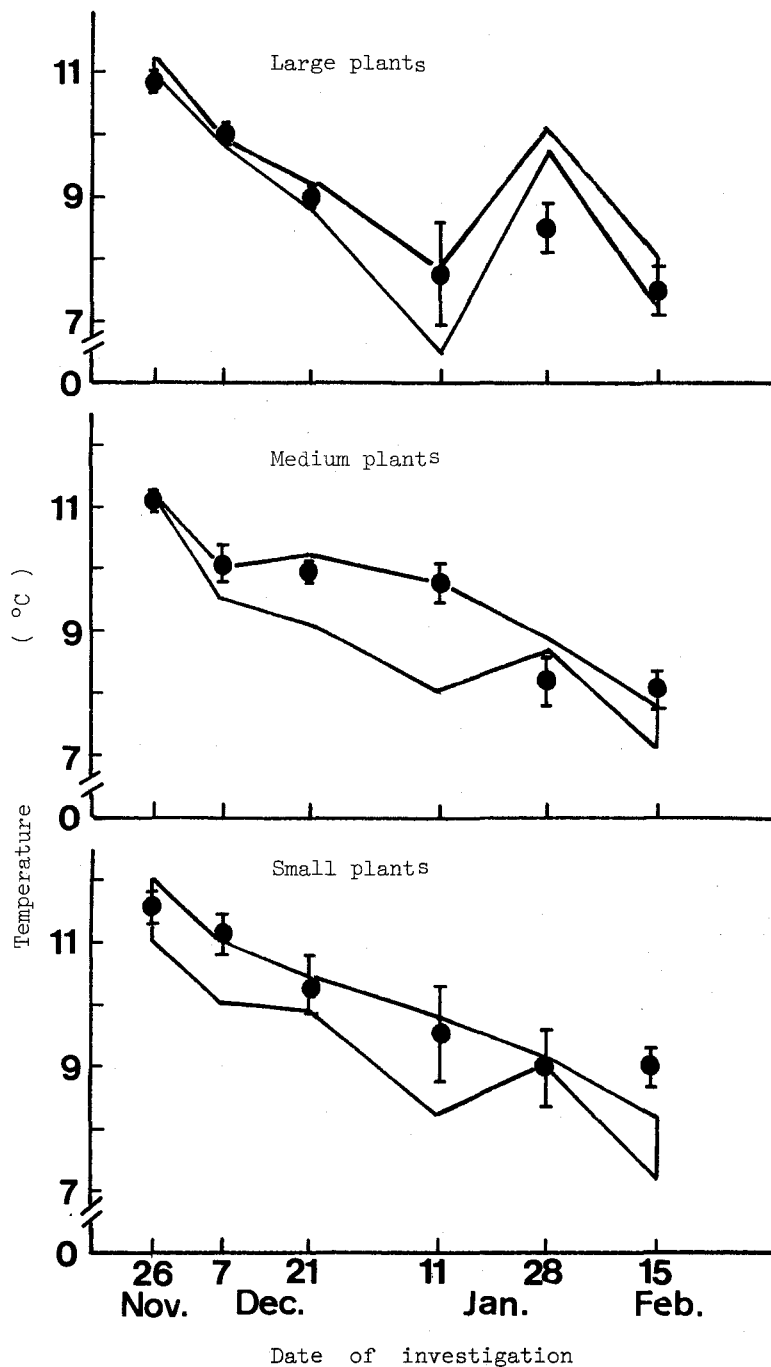


Figure 37. The relation between rhizome temperature and water temperature (both at surface and at 10cm below surface) during investigation at Tera-ike. Vertical bars represent S.D. of the average.



Table 9. Change in water content of rhizome during investigation at Tera-ike.

|             | Water content ( % dry weight ) |          |          |          |
|-------------|--------------------------------|----------|----------|----------|
|             | Date sampled                   |          |          |          |
|             | Dec. 7                         | Jan. 11  | Jan. 28  | Feb. 15  |
| Total water | 4656.052                       | 4020.454 | 1261.441 | 1755.662 |
| Free water  | 4649.836                       | 4008.287 | 1246.084 | 1751.681 |
| Bound water | 6.216                          | 12.167   | 15.357   | 3.981    |

Table 10. Change in percent survival of rhizome during investigation at Tera-ike.

| Date sampled                    | Survival (%) |                             |  | Killing (%) |
|---------------------------------|--------------|-----------------------------|--|-------------|
|                                 | ( White      | Purplish red ) <sup>a</sup> |  |             |
| Dec. 7 ( L, M, S ) <sup>b</sup> | 100.00       | (100.00 0.00)               |  | 0.00        |
| Jan. 11 ( L )                   | 100.00       | ( 67.00 33.00)              |  | 0.00        |
| ( M )                           | 100.00       | ( 50.00 50.00)              |  | 0.00        |
| ( S )                           | 75.00        | ( 25.00 50.00)              |  | 25.00       |
| Jan. 28 ( L )                   | 100.00       | ( 10.00 90.00)              |  | 0.00        |
| ( M )                           | 76.67        | ( 3.33 73.34)               |  | 23.33       |
| ( S )                           | 70.00        | ( 26.67 43.33)              |  | 30.00       |
| Feb. 15 ( L, M, S )             | 0.00         | ( 0.00 0.00)                |  | 100.00      |

a: The color of rhizome.

b: L; Large plants ( Average of plant height 52.6cm )  
M; Medium plants ( Average of plant height 31.2cm )  
S; Small plants ( Average of plant height 10.8cm )

## ii) 岡山大学農業生物研究所構内

i) の大阪府寺池の場合は極寒期においても水温が高い生息地であったが、本構内のポットは野外に放置した自然状態で、かつ、ポットの容量が小さいことから結氷し易い条件下であった。ポットの水面下 5 cm の日最高水温及び最低水温と水表面が結氷した日、ならびに植物体の採取日との関係を Fig. 38 に示し

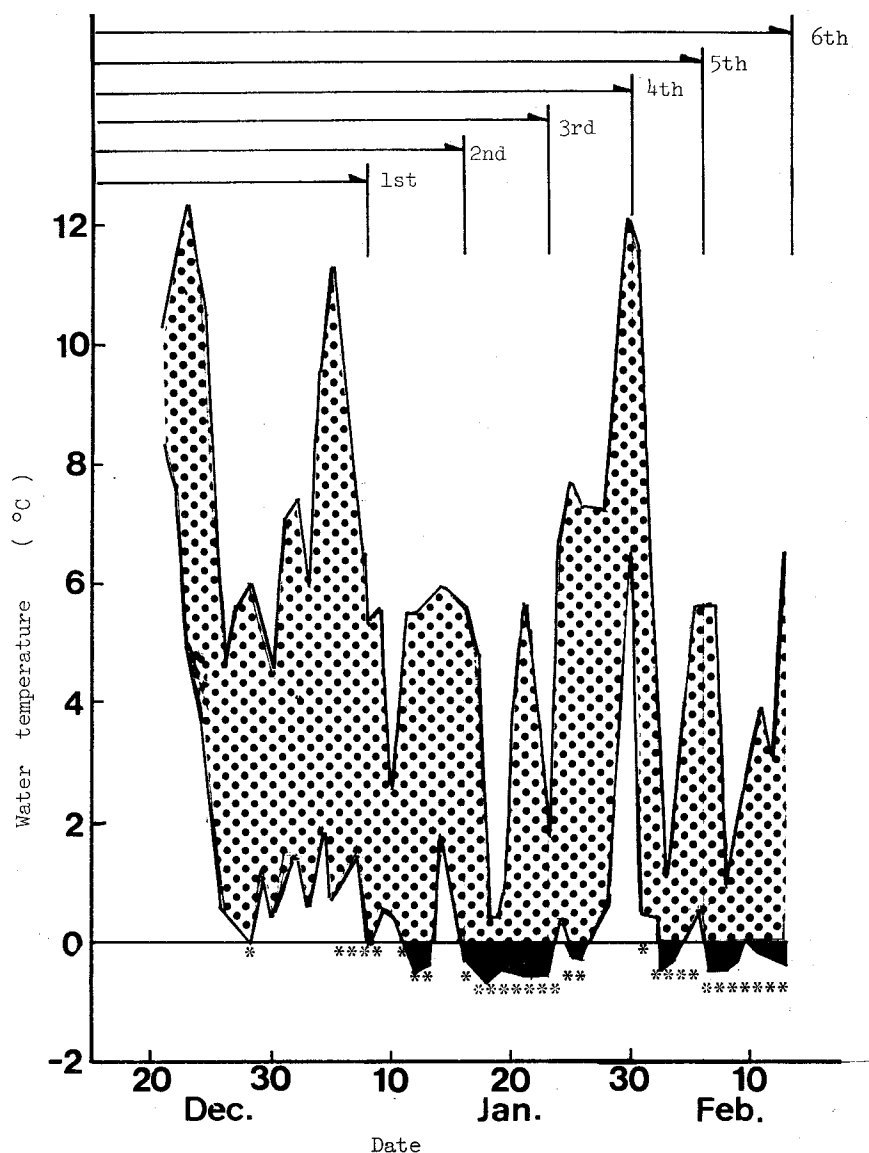


Figure 38. Change in daily maximum and minimum water temperature at 5cm below surface during investigation in Okayama. \* represents the day when the layer of ice was formed at surface. Arrow marks represent date of sampling.

た。それによると、第1回取り上げ日までは日最低水温が0℃以下の日は無く、結氷も4回観察されたに過ぎなかった。第2回目採取までの1週間は、結氷回数も多くなり、第1回目の寒波となったが、本格的な寒波は次の週に襲っている。連日、結氷が続いた。そして、第4回目採取前の1週間は、寒波が緩み、その後、再度寒波が襲来した。

次に Table 11 に成株区（大型株）と実生区（小型株）別に生存率を表わしたが、Fig. 38 の様相と比較しながら考察すると、大型株と小型株では凍害の程度が大きく異なった。両区の密度は同条件とし、採取後の空間には発泡スチロールを埋めたので、両区の耐凍性における差異は形態的か生理的な差異に基づくものと推察する。まず、小型株の場合は、第1回目で既に35%が枯死しており、連日結氷時期を経た後の第3回目採取時には生存率は10%に急激に低下した。それに反して、大型株は数回の軽い結氷では生長点には被害が及ばず、逆にハードニングされた傾向を示し、連日凍結後の3回目採取時でも80%の生存率を得た。厳冬期の木本では-3℃でハードニング効果が表われたと考えられる。しかし、その後、冷え込みが緩むと共に生存率が低下した。これは、細胞外結氷の場合、氷が形成される時よりも解氷時の方が、細胞膜が原形質より急速に水を吸収することによる致死を招き易いという理論にあてはまる現象と推察する。

なお、生存株の再生は、頂芽が凍死した場合には側芽により再生する傾向があることが認められた。

### 3. 結氷回数と再生との関係

#### (1) 実験材料及び方法

65 cm (L) × 19 cm (W) × 17 cm (H) のプランターに平均新鮮重 130 g、葉数 5.5 ~ 6.5 枚の成株で 2 ~ 4 葉の子株 2 つを有する株を 5 株投入し 11 月 12 日

Table 11. Frost injury in waterhyacinth plants under natural conditions in Okayama.

| Date sampled    | Resprouting ( % ) |              |
|-----------------|-------------------|--------------|
|                 | Large plants      | Small plants |
| Jan. 8 ( 1st )  | 100.0             | 65.0         |
| Jan. 16 ( 2nd ) | 90.0              | 60.0         |
| Jan. 23 ( 3rd ) | 80.0              | 10.0         |
| Jan. 30 ( 4th ) | 30.0              | 0.0          |
| Feb. 6 ( 5th )  | 10.0              | 0.0          |
| Feb. 13 ( 6th ) | 0.0               | 0.0          |

から1ヶ月間、無加温の温室内で低温に順化させ、その後、結氷回数が1, 3, 5, 9, 11回に遭遇するよう随時プランターを屋外へ搬出した。一定期間放置し予定通りの結氷処理を行った後、無加温の温室内に戻し、被害程度を観察した。1～2週間経させた後、15℃に加温した状態で1.5ヶ月放置し、再生の様相を観察した。処理中の水温は自記記録計で水面下5cm、葉温は水面上約10cmの葉の上面付近を熱電対で測定した。なお、反復は4反復とした。

## (2) 実験結果及び考察

まず、各処理区で遭遇した低温の時間数を水温、葉温別に Table 12 に示した。設置場所の関係上、すべてのプランターを同時に屋外に設置することができなかったため結氷回数が増加するに伴い必ずしも低温に暴露した時間が増加するとは限らなかった。しかし、同一条件下で、水温と葉温が大きく異なり、葉温の変動幅が広いことが明らかになり、微気象環境の重要性が確認された。

Table 12. The relation between number of times of exposure to freezing and exposure time to low temperatures.

| No. of times of exposure to freezing |             | Exposure time to low temperatures ( hours ) |                  |                  |                 |                |                |         |
|--------------------------------------|-------------|---|------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|---------|
|                                      |             | Temperature ( °C )                          |                  |                  |                 |                |                |         |
|                                      |             | $t \leq -5$                                 | $-5 < t \leq -3$ | $-3 < t \leq -1$ | $-1 < t \leq 1$ | $1 < t \leq 3$ | $3 < t \leq 5$ | $5 < t$ |
| 1                                    | Water temp. | 0.0   | 0.0              | 0.0              | 50.5            | 12.5           | 3.0            | 6.0     |
|                                      | Leaf temp.  | 1.5   | 6.5              | 16.5             | 22.5            | 7.0            | 6.0            | 11.0    |
| 3                                    | Water temp. | 0.0   | 0.0              | 0.0              | 51.5            | 13.5           | 7.5            | 6.0     |
|                                      | Leaf temp.  | 2.0   | 9.5              | 23.5             | 26.0            | 9.0            | 7.5            | 16.5    |
| 5                                    | Water temp. | 0.0   | 0.0              | 5.0              | 77.5            | 27.5           | 21.5           | 36.5    |
|                                      | Leaf temp.  | 0.0   | 6.5              | 31.5             | 43.0            | 28.0           | 16.0           | 41.0    |
| 9                                    | Water temp. | 0.0   | 0.0              | 82.5             | 262.5           | 114.0          | 81.0           | 86.0    |
|                                      | Leaf temp.  | 17.5  | 47.5             | 109.5            | 147.0           | 82.0           | 76.5           | 141.0   |
| 11                                   | Water temp. | 0.0   | 0.0              | 82.0             | 261.5           | 128.0          | 126.5          | 193.0   |
|                                      | Leaf temp.  | 9.0   | 43.5             | 120.5            | 149.5           | 109.5          | 117.0          | 242.0   |

次に、結氷回数と再生の様相を Fig. 39 に示したところ、次のような結果を得た。すなわち、1回の結氷で、頂芽が致死した株は30%であったが側芽による再生が認められ完全に枯死した株は無かった。結氷3回及び5回暴露すると、頂芽による再生は45%及び40%と急激に減少し、側芽まで致死をきたし、枯死した株が5%生じた。結氷9回では頂芽による再生株は無く、70%が側芽

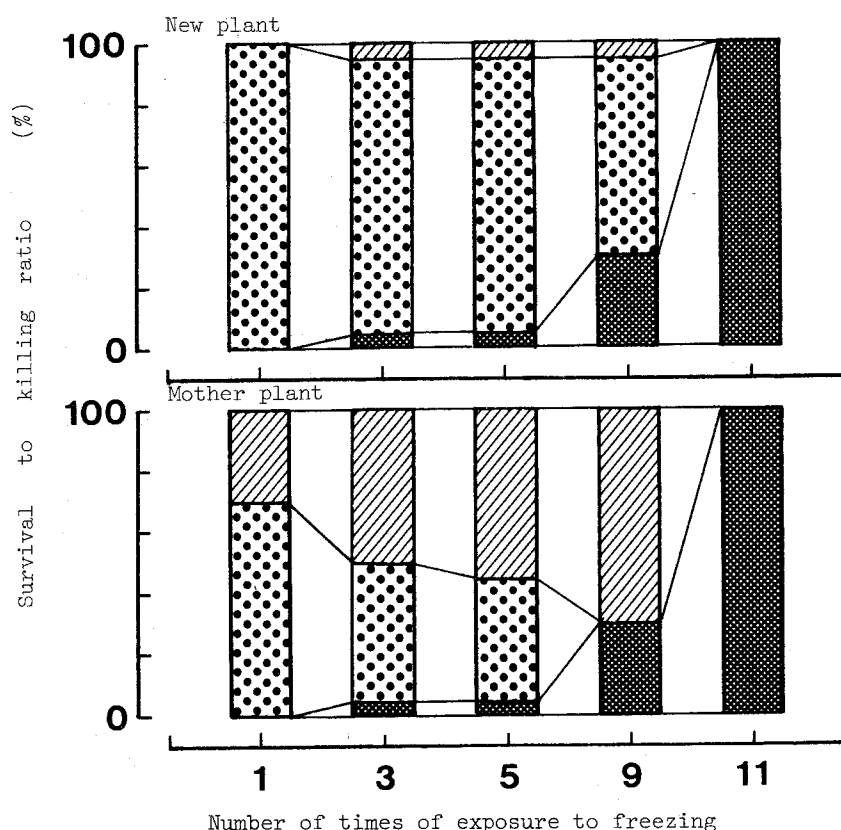


Figure 39. Effect of number of times of exposure to freezing on resprouting ability of rhizome under natural conditions.

Killing, 
  Resprouting by terminal bud, 
  Resprouting by lateral bud.

により生存した。結氷11回では生存株は無かった。一方、子株に関しては、多くの株が小型で水中に沈んでいた為、頂芽による再生率が高かった。

一方、頂芽の生存率と $-1^{\circ}\text{C}$ から $1^{\circ}\text{C}$ の範囲の低温に暴露した時間との相関関係を調べたところ、Fig. 40の通りとなった。頂芽の枯死率は $-1^{\circ}\text{C} \sim 1^{\circ}\text{C}$ の暴露時間の増加に対して指数関数的に高まった。水温及び葉温共に相関が認められたが、葉温との相関の方が高かった。ところが側芽の生存率に関しては結氷9回までは70%であったのが結氷11回で0%と激減し、低温暴露時間との関係は、まったく認められず、他に要因があると憶測するが本研究では解明できなかった。

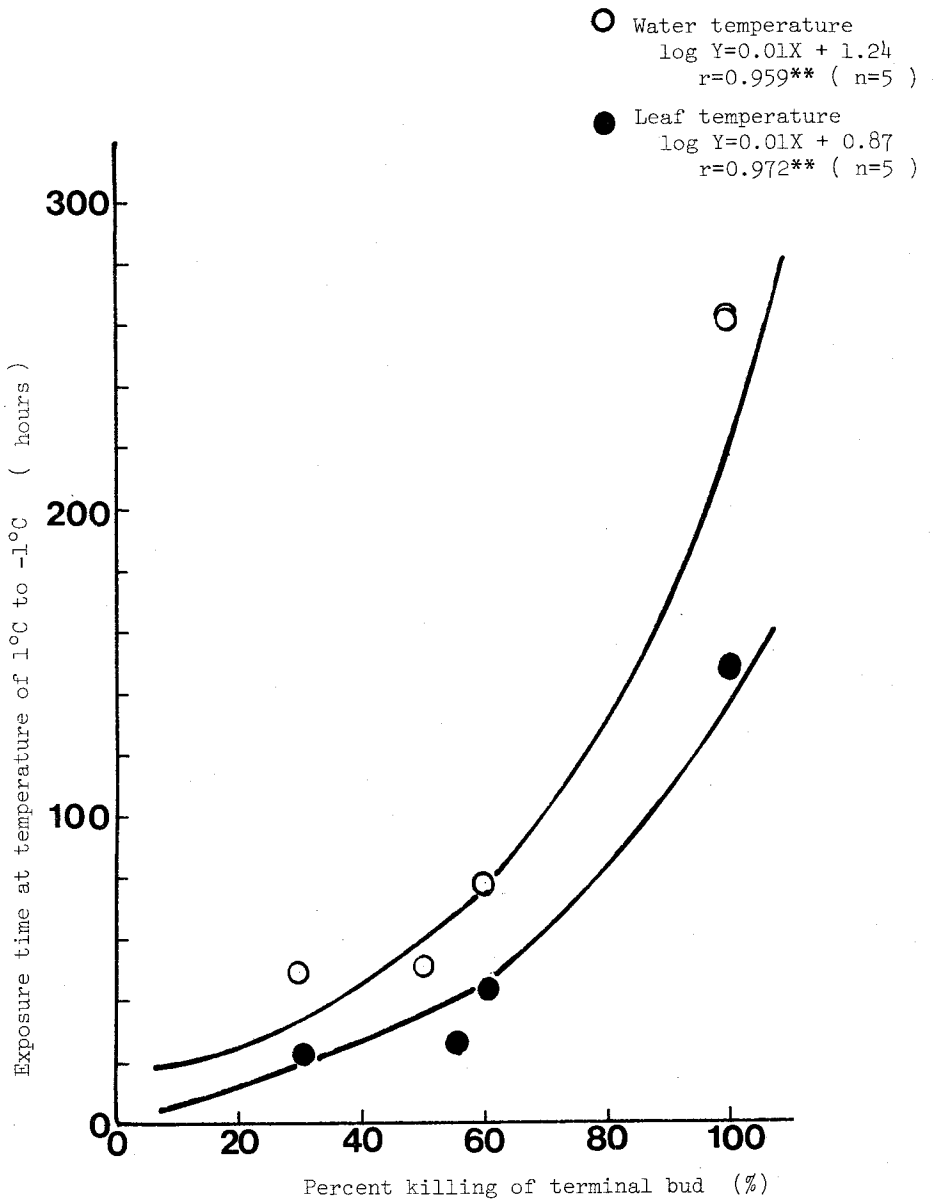


Figure 40. Effect of exposure time at temperature of 1°C to -1°C on killing of terminal bud of mother plant.

さらに、生存率と共に葉身及び葉柄の寒害程度と-1°C ~ 1°Cの暴露時間の対数との関係を検討した。なお寒害程度とは、葉身及び葉柄の被害面積の小さい順に1, 2, 3の値を与え、各々の段階の被害出現率にそれらの値を乗じた数で示した。つまり、すべての葉身あるいは葉柄が枯死した状態では300の値を持

つことになり数字が大きいほど被害程度が大きいことを意味する。成株と子株別に、葉身と葉柄別に、各々葉温及び水温との相関係数を Table 13 に表わしたところ、すべての組みあわせに 5%水準で正の相関関係が認められた。しかしながら、成株、子株共に葉柄の方が葉身より相関が低い傾向が認められ、さらに水温より葉温の方が影響が大きいことが示唆された。一方富久らは、<sup>150)</sup> 葉身及び葉柄の寒害程度と 0℃以下の積算気温との関係を論じ、0℃以下の積算気温の対数と高い正の相関関係を認めている。

本章では、温度と生育及び繁殖との関係を明らかにする為、いくつかの実験を行ってきたが、得られた結果について考察を加える。

温度は植物の生育に最も大きく影響を及ぼす環境要因でありながら、ホテイアオイについては、温度と生育反応に関する知見は少ない。野外観察により、最適生育水温は 21℃～27℃<sup>45)</sup>、13℃～24.6℃、18.6℃～21.5℃<sup>14)</sup> などと報告されているにすぎない。本研究は気温を制御したので水温は約 2℃気温より高かったが、30℃区で Penfound ら<sup>102)</sup> が述べている高温障害が生じるほど水温は上昇しなかった。本研究で得られた結果で興味深く思われたのは高温区では形成された株が親株となり、新たに小株や花梗を形成するまでになる期間が非常に短いこと、それに反して低温区では形成数こそ多いが、子株の生育速度が遅かったことである。この傾向は、成株、実生株共に認められたが、実生株の場合、15℃付近では発芽は可能であるが、その後の生育は顕著に劣

Table 13. Correlation coefficients (r) between winter injury of leaves and petioles and exposure time at temperature of 1°C to -1°C.

| Temperature<br>of 1°C to -1°C | Winter injury |          |              |          |
|-------------------------------|---------------|----------|--------------|----------|
|                               | Large plants  |          | Small plants |          |
|                               | Leaves        | Petioles | Leaves       | Petioles |
| Water temperature             | 0.912*        | 0.829*   | 0.905*       | 0.880*   |
| Leaf temperature              | 0.938**       | 0.865*   | 0.925**      | 0.880*   |

ることが明らかになった。前述した通り、本研究での15℃～20℃区の増殖及び生育反応は我が国の10月～11月に野外で観察される状況と一致する。普通、自生植物は夏の終わりか、秋のきまった時期に伸長を止め、冬仕度に入るが、特定の限界日長で伸長を止める場合が多い。<sup>115)</sup> ホテアオイの場合、日長より水温低下に反応して生育期から生育停止期に転換すると推測される。従って、15℃～20℃で生育している個体は外部形態の変化と併せて体内の代謝も変化していると推察され、生理的にも興味深い対象となるであろう。この時期に形成される多数の小型の子株は第3節4の実験結果より比較的越冬しやすい環境条件下に存在することから、越冬に対するホテアオイの戦略法とも考えられる。

さらに水温が低下した場合の冬期の低温障害であるが、これに関する報告を検討すると、やはり野外での観察結果が多く、2日間の結水下では生存率100%、<sup>46)</sup> 3日間の結水下では50%の生存率<sup>14)</sup> となっている。Penfound ら<sup>102)</sup> は5段階の設定温度で暴露時間を変化させることにより生存率を検討しているが、-5℃ 24時間暴露までは生存株を認めたと報告している。本研究も、今までの報告例と同様に野外観察を中心とした域を出ず、暴露温度や時間を設定して詳細な検討を行う実験は、課題となったが、本研究から、今後の研究方向が明確にされた。すなわち、結水しない水温下でも茎葉部が極度の低温に曝された場合、代謝が乱れて枯死する点、小型株でも独立した株とストロンで親株と連結した株とでは耐凍性が異なる点、頂芽致死の場合の側芽再生の機構、水面下・水表面・水面上の微気象の探索及び本草のハードニング効果の究明などである。酒井<sup>114)</sup> は、凍結に耐える水棲植物の耐凍度は外囲温度に左右されない種が多いと述べているが、本草の耐凍性の変動を体内の糖濃度や細胞の生体膜の変化など生理的な側面から究明する必要もあろう。

我が国において、ホテアオイの越冬性を解明することは、繁茂地では次年度に発生する量を決定する重要な要因を把握することになり、一方、本草を利用する観点からは生存可能な条件を知る上で必要な事項である。



## 第4節 摘 要

1. 本研究は、温度と成株及び実生株の生育や繁殖との関係、さらに低温に対する反応を解明する目的で行った。
  2. 発芽は高温区で早かったが、15℃区でも発芽率は比較的高かった。
  3. 実生の初期生育は2週間以内は明確に15℃から30℃まで差が生じたが、4週間後は25℃と30℃で大差が無くなった。また、抽水区が沈水区より生育が促進された。
  4. 実生株の温度に対する生育特性は、30℃区では形成された新個体の生育が優先されるのに対して、20℃区では新個体を形成することが優先される傾向を認めた。
  5. 実生株の花梗の形成時期及び形成数は有意に高温区で早くかつ多かった。また、花梗数と子株数との相関は30℃区と20℃区で高く、30℃区では子株が4個前後、20℃区では9個前後形成されると花芽形成へと質的変換が起きることが認められた。
  6. 成株の場合、実生株と同様に低温区で新個体の形成数が多く、矮小化が認められた。
- 一方、成株の乾物重増加は温度条件により有意に異なったが、25℃区と30℃区は差が認められず、双方共最適生育温度と考えられた。
- また、花梗形成も高温区で優れ、積算温度が関与していると推察された。
7. 我が国における本草の分布北限は、1月の月平均気温1℃、年平均気温13℃及び最寒月の日最低気温値-3℃の等温線と一致した。
  8. 野外観察より、結氷しない水温下でも茎葉部が極度の低温に曝された場合は枯死した。また、ハードニングの影響により0℃以下の遭遇日数と生存率との相関は認められず、また小型株と大型株では生存率が異なった。
  9. 頂芽は結氷による障害が大きかったが、側芽の生存による再生が多く観察された。また、頂芽の枯死率は-1℃～1℃の葉温及び水温の暴露時間の増加に対して指数関数的に高まった。

### 第3章 自然水域における生産量及び群落構造の解析

ホテイアオイが異常繁茂を引き起こす原因は、本草の旺盛な繁殖力にあり、第1章で述べた通り窒素やリン等の水中の栄養塩を含めた水環境とのかかわりが大きいので、諸外国では古くから本草の生産量に関する研究がなされてきており、窒素やリンの吸収能が高いことが認められている。<sup>105)</sup>そして、本草の生育特性をうまく利用した積極的な利用法に関する基礎研究も着実に進められている。特にアメリカではNASA（アメリカ航空宇宙局）を中心に、水質浄化能力が細かく検討され、フロリダ州、カリフォルニア州、テキサス州、ミシシッピ州などで実際に廃水処理システムが稼働しており良好な結果を得ている。<sup>159)</sup>

一方、我が国においては、ホテイアオイの生産量に関する報告は皆無で、繁茂地の実態や生理生態的特性のみが報告されているに過ぎなかった。<sup>24, 83, 152)</sup>

しかし、最近、バイオマスの利用が注目を浴び始めたことにも関連して、本草のバイオマス生産が俄に関心をよんでいる。

従って、本章は、温帯地域の我が国の自然水系で、どれほどの生産量が得られるのか、群落構造を解析しながら考察した。

#### 第1節 個体群の生長と群落構造の動態

諸外国での生産量調査は、短期間の現存量測定を基礎に試算した報告が多く、生態学的な観点から個体群の群落構造の解析を行いながら検討した知見は、ほとんど得られていない。本節では、毎年、ホテイアオイが大発生する自然水域を選定し、季節変化及び一定間隔の収穫という管理が加わることにより、群落構造が変化する様相を究明した。

##### 1. 実験材料及び方法

岡山県南部に所在する児島湖及びその湖内に流入する河川の一つである倉敷川の河口から約2 km上流の2地点を調査場所として設定した。両地点共、毎年ホテイアオイが異常繁茂する水域である。両地点の沿岸水域に、塩化ビニール製パイプ（直径30mm）で一定面積の枠を作製し、これに30 cm角の発泡スチロールを付けて水面上約20 cmの高さに浮かせ、竹杖とロープで固定した。

ホテイアオイが逸出するのを防ぐ為、周囲に幅 50cm の漁網をとりつけた。2 地点共に同一面積を有する 2 反復の調査を行い、3 処理を設けた。すなわち、第一の処理区は  $1 \times 1 m^2$  の面積とし、一定期間の最大増殖力を調査する為、調査時毎に 4 株の親株から形成されたすべての新子株を収穫した。第二の処理区は、 $1 \times 4 m^2$  の占有面積でホテイアオイの被度が 100% に達した後は、現場での測定作業終了後に 7 月 8 日から 11 月 5 日迄は半量、11 月 25 日と 12 月 24 日は 4 分の 1 量を収穫して生育期間中、密度の影響が生じないように管理した（以後、収穫管理区と称す）。一方、第三処理区は同面積で、本草投入後、収穫作業は一切行わず、自然状態で放置し、密度効果による生長の飽和性を検討した（以後、自然放置区と称す）。

1980 年 5 月 28 日に平均新鮮重 60 g、平均草高 15 cm のホテイアオイ成株 5 株を各処理区に投入した（第一処理区のみ 4 株）。調査開始後、約 2 ケ月間は 10 日間隔、その以降は 12 月 24 日まで毎月 2 回調査した。ただし、倉敷川では 11 月 5 日の調査時に、水鳥に葉身部をすべて食べられていることが発覚したので、その時点で調査を中止した。

調査項目は、株数、葉数、草高、新鮮重、乾物重、水質及び植物体内の窒素とリン含有量とした。前者 4 項目は現場で測定し、植物体内の窒素含有量はガンニング変法、リンはアスコルビン酸変法を用いて分析した。

## 2. 実験結果及び考察

### (1) 調査地点の水質変動

調査時に採水した倉敷川河川水及び児島湖湖水の水質を Table 14 及び 15 に示した。全般的には栄養塩濃度は 6 月末から 7 月上旬に高いピークを示し、夏から秋にかけて減少傾向がみられた。調査期間中の平均全窒素 (T-N) 濃度は、河川水で  $2.83 \pm 1.04 \text{ mg/l}$ 、湖水で  $2.29 \pm 0.84 \text{ mg/l}$ 、一方平均全リン (T-P) 濃度は前者で  $0.378 \pm 0.106 \text{ mg/l}$ 、後者で  $0.347 \pm 0.170 \text{ mg/l}$  であった。リン濃度の高い富栄養型の水域であるが、T-N と T-P の水質変動の相関は低く、主要な汚濁源は異質と考えられる。

ところで河川水の無機態窒素 ( $\text{Inorg. -N}$ ) の季節変動は T-N の変動に追従しており、T-N 中に占めるその割合は平均 66.2% であるのに対し、湖水の

Table 14. Seasonal change in water quality at Kurashiki river.

| Date     |    | NO <sub>2</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N | NH <sub>4</sub> -N | Inorg-N       | Org-N         | T-N           | PO <sub>4</sub> -P | Org-P           | T-P             | Cl            | COD           | SS           |
|----------|----|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|--------------|
| June     | 9  | 0.096              | 0.936              | 2.320              | 3.35          | 1.20          | 4.55          | 0.412              | 0.070           | 0.482           | 53.4          | 4.08          | 33.5 (mg/l)  |
|          | 19 | 0.128              | 0.936              | 1.026              | 2.09          | 1.26          | 3.35          | 0.317              | 0.041           | 0.358           | 44.2          | 5.63          | 16.5         |
|          | 28 | 0.012              | 0.785              | 1.544              | 2.34          | 0.26          | 2.60          | 0.276              | 0.100           | 0.376           | 45.0          | 4.84          | 16.0         |
| July     | 8  | 0.080              | 0.606              | 0.942              | 1.63          | 0.54          | 2.17          | 0.441              | 0.156           | 0.597           | 32.5          | 7.54          | 24.8         |
|          | 17 | 0.064              | 0.498              | 0.486              | 1.05          | 0.86          | 1.91          | 0.263              | -               | -               | 28.6          | 4.08          | 30.0         |
|          | 28 | 0.072              | 0.696              | 0.636              | 1.40          | 0.84          | 2.25          | 0.364              | -               | -               | -             | 9.30          | -            |
| Aug.     | 1  | 0.056              | 0.620              | 0.914              | 1.59          | 0.52          | 2.11          | 0.291              | -               | -               | -             | 5.99          | -            |
|          | 11 | 0.040              | 0.912              | 1.198              | 2.15          | 0.70          | 2.85          | 0.276              | 0.114           | 0.390           | -             | 6.68          | -            |
| Sept.    | 4  | 0.048              | 0.708              | 0.423              | 1.18          | 0.77          | 1.95          | 0.225              | 0.097           | 0.322           | 21.3          | 4.03          | 26.0         |
|          | 18 | 0.056              | 0.622              | 0.120              | 0.80          | 2.31          | 3.11          | 0.133              | 0.166           | 0.299           | 60.0          | 8.50          | 19.6         |
| Oct.     | 17 | 0.040              | 0.938              | 0.436              | 1.41          | 0.69          | 2.11          | 0.150              | 0.088           | 0.238           | 61.3          | 6.64          | 42.4         |
| Nov.     | 5  | 0.112              | 1.472              | 2.144              | 3.73          | 1.36          | 5.08          | -                  | -               | 0.337           | 80.0          | 6.21          | 28.8         |
| *Average |    | 0.067<br>±0.033    | 0.811<br>±0.258    | 1.016<br>±0.689    | 1.89<br>±0.94 | 0.94<br>±0.54 | 2.84<br>±1.04 | 0.286<br>±0.097    | 0.104<br>±0.042 | 0.378<br>±0.106 | 47.4<br>±18.5 | 6.13<br>±1.73 | 26.4<br>±8.5 |

\* Average ± Standard deviation.

Table 15. Seasonal change in water quality at Kojima lake.

| Date     |    | NO <sub>2</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N | NH <sub>4</sub> -N | Inorg-N       | Org-N         | T-N           | PO <sub>4</sub> -P | Org-P           | T-P             | Cl             | COD           | SS           |
|----------|----|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|--------------|
| * June   | 9  | 0.088              | 0.902              | 0.598              | 1.59          | 1.23          | 2.81          | 0.293              | 0.043           | 0.336           | 120.0          | 6.08          | 22.0 (mg/l)  |
|          | 19 | 0.120              | 0.964              | 0.249              | 1.33          | 2.51          | 3.85          | 0.370              | 0.055           | 0.425           | 140.0          | 7.20          | 31.0         |
|          | 28 | 0.006              | 0.381              | 0.482              | 0.87          | 2.48          | 3.35          | 0.242              | 0.472           | 0.714           | 193.0          | 15.90         | 50.0         |
| July     | 8  | 0.000              | 0.712              | 0.272              | 0.98          | 1.53          | 2.51          | 0.200              | 0.268           | 0.468           | 43.4           | 13.60         | 40.5         |
|          | 17 | 0.015              | 0.120              | 0.130              | 0.27          | 1.09          | 1.36          | 0.177              | -               | -               | 87.3           | 7.21          | 29.6         |
|          | 28 | 0.024              | 0.576              | 0.390              | 0.99          | 0.76          | 1.75          | 0.432              | -               | -               | -              | 7.81          | -            |
| Aug.     | 1  | 0.008              | 0.249              | 0.180              | 0.44          | 1.47          | 1.91          | 0.340              | -               | -               | -              | 11.40         | -            |
|          | 11 | 0.016              | 0.433              | 0.194              | 0.64          | 1.68          | 2.32          | 0.215              | 0.102           | 0.317           | -              | 11.00         | -            |
| Sept.    | 4  | 0.007              | 0.304              | 0.015              | 0.33          | 0.38          | 0.70          | 0.257              | 0.003           | 0.260           | 26.7           | 6.39          | 38.4         |
|          | 18 | 0.024              | 0.274              | 0.032              | 0.33          | 2.16          | 2.49          | 0.094              | 0.116           | 0.210           | 107.0          | 7.87          | 30.4         |
| Oct.     | 17 | 0.036              | 0.610              | 0.337              | 0.98          | 1.24          | 2.23          | 0.100              | 0.124           | 0.224           | 38.7           | 8.51          | 48.4         |
| Nov.     | 5  | 0.016              | 0.766              | 0.306              | 1.09          | 1.14          | 2.23          | -                  | -               | 0.166           | 240.0          | 10.00         | 28.0         |
| *Average |    | 0.030<br>±0.037    | 0.524<br>±0.273    | 0.263<br>±0.137    | 0.82<br>±0.42 | 1.47<br>±0.65 | 2.29<br>±0.84 | 0.247<br>±0.106    | 0.148<br>±0.154 | 0.347<br>±0.170 | 110.0<br>±72.3 | 9.41<br>±3.05 | 35.4<br>±9.6 |

\* Average ± Standard deviation.

T-N の主要な変動要因は有機態窒素 (Org.-N) によるもので、T-N 中の Inorg.-N の占める割合は 34.6 % であった。

また、アンモニア態 (NH<sub>4</sub>-N) 窒素、硝酸態 (NO<sub>3</sub>-N) 窒素 については、河川水では NH<sub>4</sub>-N が Inorg.-N 中の 48.6 % を占め、NO<sub>3</sub>-N とほぼ同程度であったが、湖水では 31.3 % しか存在しなかった。これらの比率は水の酸化状態によって変化するもので、化学形態の差異は植物が利用する上で大きく影響を与える要因である。<sup>85)</sup> T-N 濃度は河川の方が高く、河川から湖内へ主として無機態として流入した窒素は、その内の一部は脱窒や底泥への堆積などによって水中から除去されると共に、生物作用によって全濃度としては減少しつつ、有機化されている。

リンも窒素ほどに著しくはないが、河川から湖内に流入すると、全濃度と PO<sub>4</sub>-P が減少し、Org-P 濃度の増加がみられた。

また、この傾向は化学的酸素消費量 (COD) にも認められ、河川水の平均濃度 6.1 ppm が湖内では 9.4 ppm と増加しており、湖内での COD 物質の内部生産が考えられる。懸濁物質 (SS) についても湖内の方が平均値で約 9 ppm 高い。塩素イオン (Cl<sup>-</sup>) については児島湖締切堰堤の樋門から海水が流入するために、河川水より湖水の方が約 2.3 倍高い値を示した。水温については両地点間に差異は無く、調査開始時から 10 月上旬までは 24℃～30℃で、ホテイアオイの生育に最適温度であった。その後、10 月中旬で約 20℃、11 月上旬で約 15℃、11 月下旬で約 10℃と漸次低下し、12 月下旬には約 5℃となった。

## (2) 最大増殖力

第一処理区より密度による抑制なしに最大増殖が実現した場合の各時期の相対増殖率 ( $\overline{RGR}$ ) と倍加日数 (DT) を求めた。 $\overline{RGR}$  と倍加日数は次式<sup>69)</sup>により計算した。

$$\overline{RGR} = \frac{\ln X_t - \ln X_0}{t} \quad DT = \frac{\ln 2}{\overline{RGR}}$$

ただし  $X_0$  : 初期密度、 $X_t$  :  $t$  日後の密度。

Table 16 によると、 $\overline{RGR}$  は倉敷川で 0.146 ~ 0.298 / day、児島湖で 0.080 ~ 0.329 / day の値であった。ウキクサの場合も大抵は 0.1 ~ 0.3 の値にあり、

Table 16. The relative growth rate (  $\overline{\text{RGR}}$  ) and the doubling time in days for the number of plants under potential growth condition.

| Date    | River               |                                 |                    | Lake                |                                 |                    |
|---------|---------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------|
|         | No. of new plants/m | $\overline{\text{RGR}}$ (1/day) | Doubling time(day) | No. of new plants/m | $\overline{\text{RGR}}$ (1/day) | Doubling time(day) |
| May 28  | 0.0                 |                                 |                    | 0.0                 |                                 |                    |
|         |                     | 0.146                           | 4.73               |                     | 0.175                           | 3.95               |
| June 9  | 19.2                | 0.209                           | 3.31               | 28.8                | 0.230                           | 3.01               |
|         | 19 28.4             | 0.264                           | 2.62               | 36.0                | 0.282                           | 2.46               |
|         | 28 39.2             | 0.221                           | 3.14               | 46.4                | 0.231                           | 3.00               |
| July 8  | 32.4                | 0.298                           | 2.33               | 36.4                | 0.287                           | 2.41               |
|         | 17 54.5             | 0.278                           | 2.50               | 49.0                | 0.301                           | 2.30               |
|         | 28 81.0             | 0.213                           | 3.26               | 105.5               | 0.230                           | 3.01               |
| Aug. 11 | 74.5                | 0.286                           | 2.42               | 96.5                | 0.329                           | 2.11               |
|         | 19 35.5             | 0.177                           | 3.93               | 51.5                | 0.168                           | 4.12               |
| Sept. 4 | 63.5                | 0.213                           | 3.25               | 55.0                | 0.207                           | 3.35               |
|         | 18 75.0             | 0.212                           | 3.27               | 68.5                | 0.207                           | 3.34               |
| Oct. 2  | 73.5                | 0.185                           | 3.74               | 69.0                | 0.185                           | 3.74               |
|         | 17 60.5             | -                               | -                  | 60.5                | 0.123                           | 5.63               |
| Nov. 5  | -                   |                                 |                    | 37.5                | 0.080                           | 8.61               |
|         | 25                  |                                 |                    | 16.0                |                                 |                    |

本草と近似の値を持つ。<sup>124)</sup> 両地点の、その季節的变化を Fig. 41 に示したが、地点間の差異は無くほぼ同様の傾向であった。すなわち、調査開始後6月下旬までは  $\overline{\text{RGR}}$  は高く、梅雨期に少し低くなり梅雨明けと同時に回復し、8月中旬にピークをもつ。9月から10月上旬にかけては初夏と同程度の値で、10月中旬以降、急激に低下する。

一方、調査期間中の旬間別平均気温と旬間別日照時間を岡山県気象月報より抜粋して Fig. 42 にまとめたが、旬間別平均気温のカーブと  $\overline{\text{RGR}}$  のそれが非常に良く一致した。1980年は例年にない冷夏で平均気温も30℃を越えることは

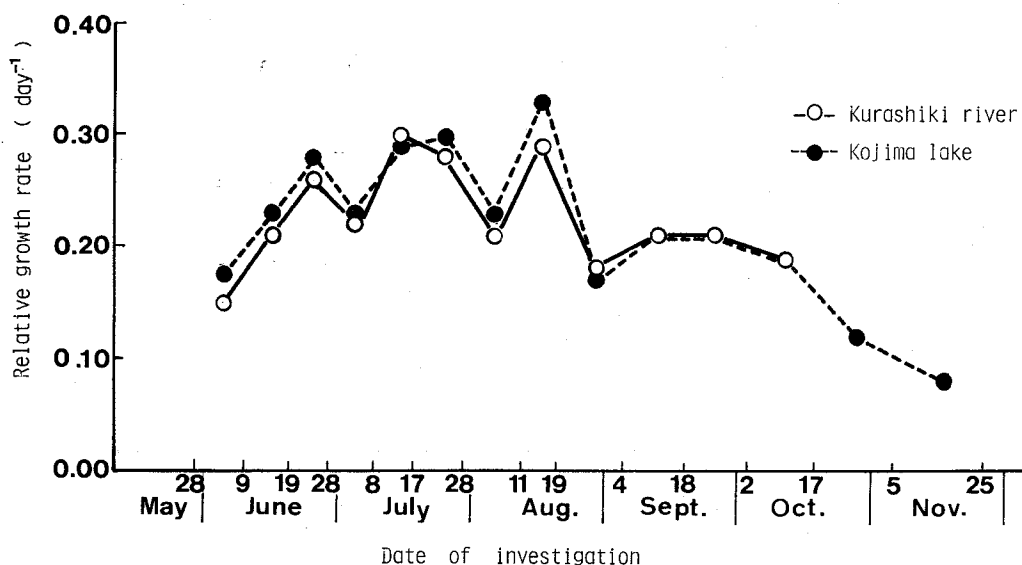


Figure 41. Seasonal variation in the relative growth rate for the number of plants under potential growth condition.

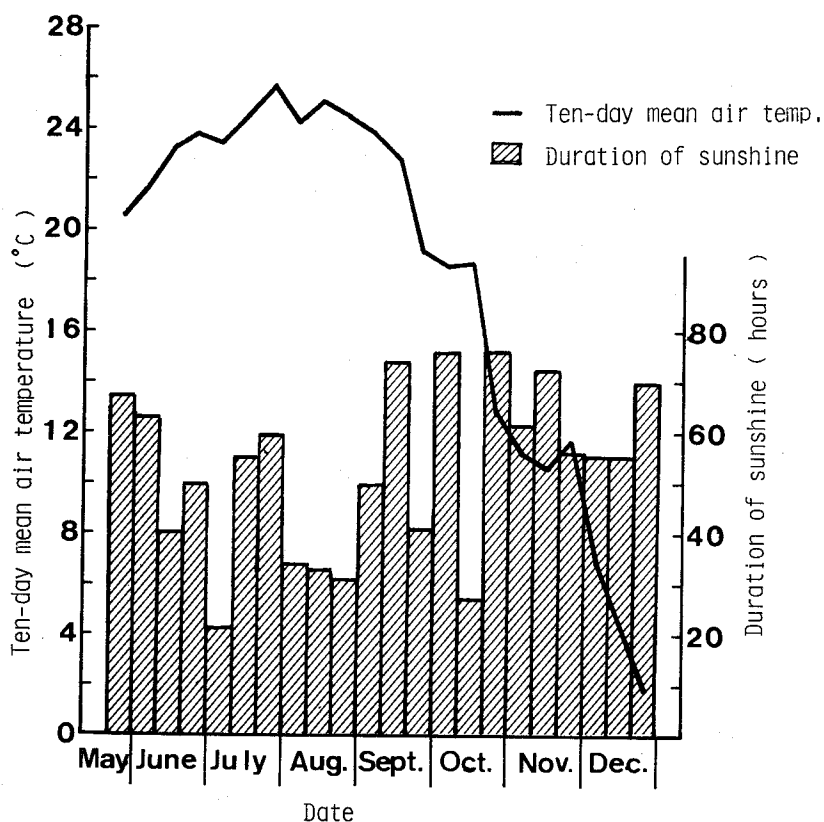


Figure 42. Seasonal change in ten-day mean air temperature and the duration of sunshine in Okayama from May to December, 1980. (After Monthly report of the Okayama meteorological agency)

なく、特に8月の低温と日照時間不足はホテニアオイの増殖及び生長に大きく関与したと考えられるので、本年度のデータは一般性が少し欠けるのであるが、逆に気象要因と夏期の増殖との相関が高いことが認められた。

なお、個体数が2倍になるのに要する日数は、 $\overline{\text{RGR}}$ が高くなれば少なくなる。密度による影響がまったく無い場合、Table 16に示す通り両地点共、10月中旬までは2日から5日以内であった。10月下旬以降、気温が低下するにつれて倍加日数は増した。

### (3) 個体数の動態

葉数4枚未満の幼株と4枚以上の成株にわけて個体数を測定し、各測定時における個体群中のその割合を Fig. 43 及び Fig. 44 に示した。Fig. 43 は自然放置区であるが、両地点共7月8日に被度100%に達した後、急激に幼株の割合が低くなっており子株を形成する空間が少なくなったことが明らかである。10月2日で調査を中止したのでその後の動向が把握できなかったが、秋期には幼株の割合が増加する兆しがみられる。

一方、収穫管理区では7月8日以降11月5日まで常に半量を収穫したので子

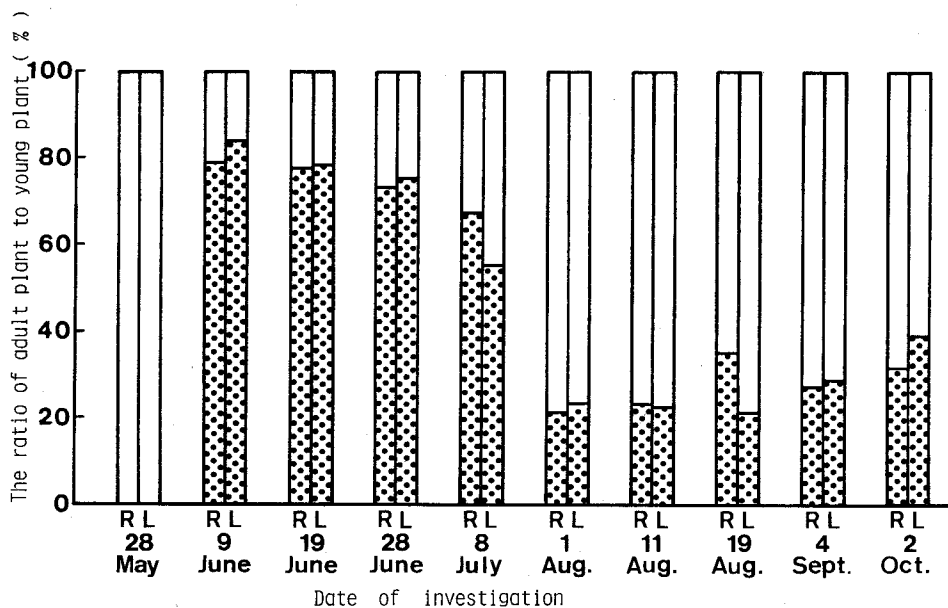


Figure 43. Variation in the ratio of adult plant to young plant in the natural unharvested population. Young plant represents small plant less than four leaves.  
□ : Adult plant, ▨ : Young plant.



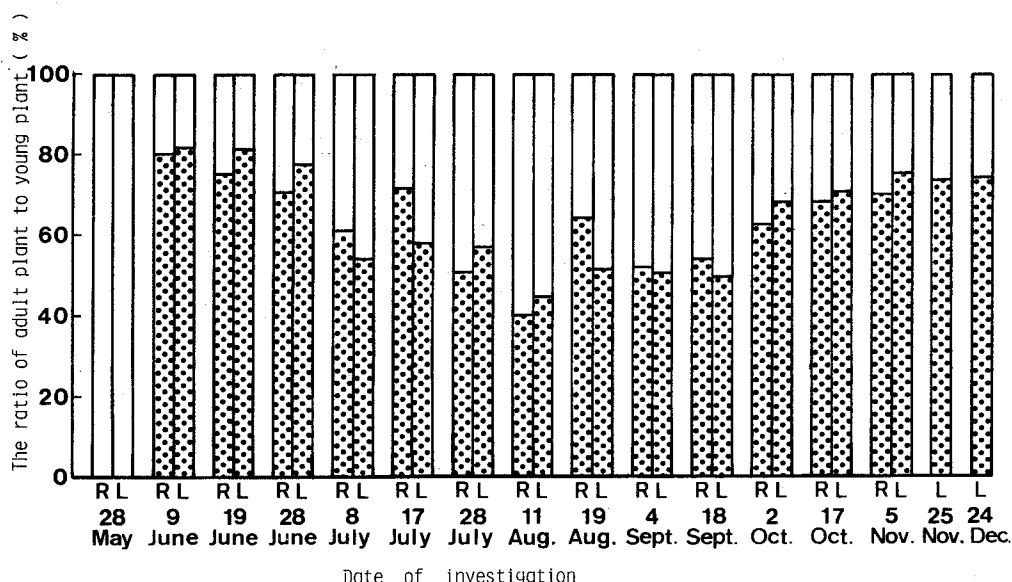


Figure 44. Variation in the ratio of adult plant to young plant in the periodically harvested population. Young plant represents small plant less than four leaves.  
 □ : Adult plant, ▨ : Young plant.

株形成の空間が十分に存在し、夏期にやや幼株の構成割合が低下したものの約50%の値を保持した。その後、秋から冬にかけて気温が低下すると共に、初夏の被度100%以前の個体群と同様の構成になった。これは、室内実験で15℃～20℃の低温に遭遇させると子株形成が盛んになり、また生じた子株も低温の為、小型化した状態であることを既に認めているが、<sup>89)</sup> 自然状態でもこの現象が起ることを示している。

次に Table 17 に収穫管理区における個体数の動態をまとめた。被度が100%に達する7月8日までは  $\overline{RGR}$  は高く、やや児島湖の方が増殖が速かった。7月中旬から下旬にかけて両地点共、最高の個体群密度となり、8月から10月は、121～176/㎡の状態を維持し、11月上旬に幼株増加から一時密度が高くなったものの、その後は10℃以下の低温の為、急激に低下した。本調査では、個体群の過飽和状態が生じないように管理すると、 $\overline{RGR}$  は倉敷川で平均0.062/day、児島湖で平均0.052/dayの値を得たが、他の地域ではカリフォルニア州で0.064～0.074/day、<sup>15)</sup> コンゴ川で0.049/day<sup>33)</sup> とほぼ近い値が報告されている。

また、倍加日数については Penfound ら<sup>102)</sup> の調査では11～18日、Parsons

Table 17. Population density, the relative growth rate (  $\overline{\text{RGR}}$  ) and the doubling time for the number of plants in the periodically harvested population.

| Date    | River                           |                                 |                    | Lake                            |                                 |                    |
|---------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|
|         | Number of plants/m <sup>2</sup> | $\overline{\text{RGR}}$ (1/day) | Doubling time(day) | Number of plants/m <sup>2</sup> | $\overline{\text{RGR}}$ (1/day) | Doubling time(day) |
| May 28  | 1.25                            |                                 |                    | 1.25                            |                                 |                    |
| June 9  | 6.38                            | 0.136                           | 5.10               | 6.89                            | 0.142                           | 4.88               |
| 19      | 25.75                           | 0.140                           | 4.97               | 32.88                           | 0.157                           | 4.43               |
| 28      | 71.75                           | 0.114                           | 6.09               | 131.63                          | 0.154                           | 4.50               |
| *July 8 | 157.50                          | 0.079                           | 8.82               | 234.00                          | 0.058                           | 12.05              |
| 17      | 279.00                          | 0.141                           | 4.92               | 263.00                          | 0.090                           | 7.70               |
| 28      | 257.00                          | 0.056                           | 12.38              | 267.00                          | 0.060                           | 11.55              |
| Aug. 11 | 156.00                          | 0.014                           | 49.51              | 160.00                          | 0.013                           | 53.32              |
| 19      | 174.00                          | 0.100                           | 6.93               | 134.00                          | 0.064                           | 10.83              |
| Sept. 4 | 147.00                          | 0.033                           | 21.00              | 121.00                          | 0.037                           | 18.73              |
| 18      | 148.00                          | 0.050                           | 13.86              | 157.00                          | 0.068                           | 10.19              |
| Oct. 2  | 176.00                          | 0.062                           | 11.18              | 157.75                          | 0.050                           | 13.86              |
| 17      | 166.00                          | 0.042                           | 16.50              | 146.00                          | 0.041                           | 16.91              |
| *Nov. 5 | -                               | -                               | -                  | 182.00                          | 0.048                           | 14.44              |
| 25      | -                               | -                               | -                  | 100.00                          | 0.005                           | 138.63             |
| Dec. 24 | -                               | -                               | -                  | 90.50                           | 0.006                           | 115.52             |

All values represent an average for two replicates.

\*      \* are expressed the period of 100% coverage of waterhyacinth. During this period, harvesting was conducted to provide 50% free surface area.

On Nov. 25 and Dec. 24 plants were removed from one-fourth of the surface area.

<sup>101)</sup> は 14 日としているが、個体群の生長段階で異なることが認められた。つまり、閉鎖系の中で群落が形成される途中では 7 日以内で個体数は倍になるが、群落形成後は過飽和でない状態で (60 ~ 90/㎡) 10 日から 21 日を要している。しかし、この日数は日照条件や水温等の気象要因に大きく左右される。

一方、自然放置区では Table 18 に示す通り収穫管理区と同じく 7 月中旬から下旬に最高の密度となり、倉敷川で 260/㎡、児島湖で 207/㎡ となったが、これらの値は収穫管理区より低いことが認められた。また、その後、8 月から 10 月にかけて両地点共、192/㎡ から 165/㎡ と徐々に密度が低くなってきたことから、自然状態では個体群の生長が進むと、光条件など生長要因の争奪が生

Table 18. Seasonal variation in the population density in the natural unharvested population.

|        |    | Number of plants / m <sup>2</sup> |        |
|--------|----|-----------------------------------|--------|
| Date   |    | River                             | Lake   |
| May    | 28 | 1.25                              | 1.25   |
| June   | 9  | 6.00                              | 8.00   |
|        | 19 | 20.13                             | 36.50  |
|        | 28 | 73.50                             | 147.75 |
| * July | 8  | 170.50                            | 207.00 |
|        | 23 | 260.00                            | -      |
| Aug.   | 1  | 199.00                            | 204.00 |
|        | 11 | 192.00                            | 192.00 |
|        | 19 | 182.00                            | 178.00 |
| Sept.  | 4  | 155.00                            | 170.00 |
| * Oct. | 2  | 165.00                            | 166.00 |

All values represent an average for two replicates.

\*    are expressed the period of 100% coverage of waterhyacinth.

じ個体間のせり合いから自己間引き現象が表われると推察される。最近、Censerらが<sup>22)</sup> Florida の湖で自然状態での個体群の動態を調査しているが、夏の密度は $60 \sim 90/\text{m}^2$ で、4月下旬から5月上旬に得た最高値 $186/\text{m}^2$ の50%以下に減じていることから自己間引き現象を認めている。しかし、安定した絶対密度に収束する一般法則がホテイアオイ個体群に存在するのか、もし存在するならば、その制限要因は何かなど解明すべき点は多い。

#### (4) 個体群の伸長生長

個体群の生長を解析するには、個体数の変化のような水平方向の解析と、構成個体の草高を測定することにより得られる垂直方向の解析とが重要と考えられる。従って個体群の生育初期、中期及び後期から抜粋して各時期における草高の度数分布図を作成し、個体間の相互作用を把握すると共に、収穫管理を加えた場合と自然放置した場合の個体群の伸長生長における差異を検討した。

両地点の傾向が同じであったので、児島湖のみとりあげて Fig. 45 及び Fig. 46 に示した。まず、Fig. 45 は収穫管理区だが調査開始後1ヶ月間、つまり群落形成期は背ぞろい現象が起こり、分布幅が生じない。7月8日のほぼ被度100%の段階でやや分布の幅が広がり、これより後、定期的に収穫することにより度数分布は7月から9月まで中高の典型的な正規分布を持続した。この期間の度数分布のモードが $30 \sim 40\text{cm}$ であったのに対し、10月になるとモードが草高の低い方にかたよる傾向を示し始めた。これは、Fig. 43 で幼株存在率が増加し始めた時期と一致する。そして秋から冬にかけて、低温の影響と収穫操作による占有空間の確保から、新葉はすべて丸味のある葉柄をもち、伸長生長が抑制され小型化した個体群に変じた。12月下旬には、全個体が $0 \sim 10\text{cm}$ 内に属する分布型となった。

Fig. 46 は自然放置区の場合を示している。群落形成期は収穫管理区と同じ傾向だが、7月28日の度数分布では、収穫操作が加わった時との差が明らかに認められた。自然放置すると7月から8月にかけてモードが草高の高い方にかたよる。生育が進むに伴い、このような現象が生じるのは、トウモロコシの個体群などにも認められており草高の背ぞろい現象が著しいことに因るとされている。<sup>81)</sup> この場合、個体重の度数分布のモードが小さい方にかたより、強くし

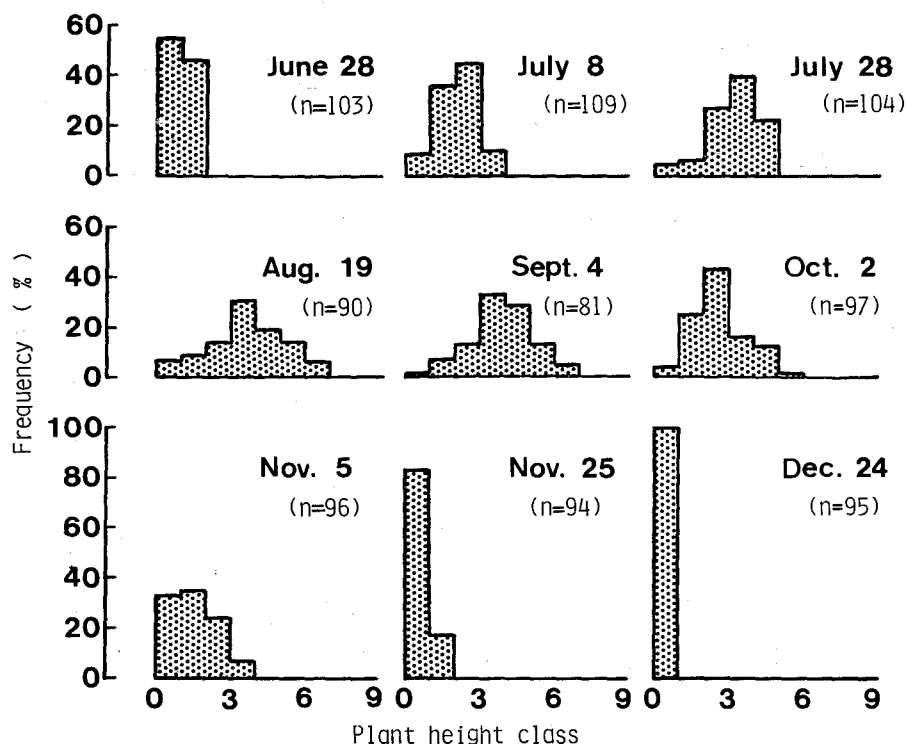


Figure 45. The plant height frequency histograms showing the seasonal change in the size structure of the periodically harvested population at Kojima lake. The plant height data are grouped into 10 cm classes (e.g. 0-1 :  $0 < H \leq 10$  cm).

型化していることが多いが、今後明らかにしたい点である。ところで、被度 100% 前の生育相を個体群の生育初期、7 月から 8 月の状態を生育中期とすれば、9 月以降は生育後期といえるであろう。この時期には分布幅が広がり尖度の低い分布型を示し、各個体の安定化した空間占有層が確立していた。本格的な低温に遭遇する時期のデータが欠落しているのだが、11 月以降は大型株の葉身が枯れて草高が低くなることと、個体の小型化が生じることにより、10 月の分布型を原型として、草高の低い側と中央との 2 つの階級にモードを持つ型に収束すると予測される。

フロリダ州の自然状態での個体群の草丈度数分布は本調査の収穫管理区と自然放置区の混合型を示している。<sup>22)</sup> すなわち、1～2 月は本調査の生育初期に

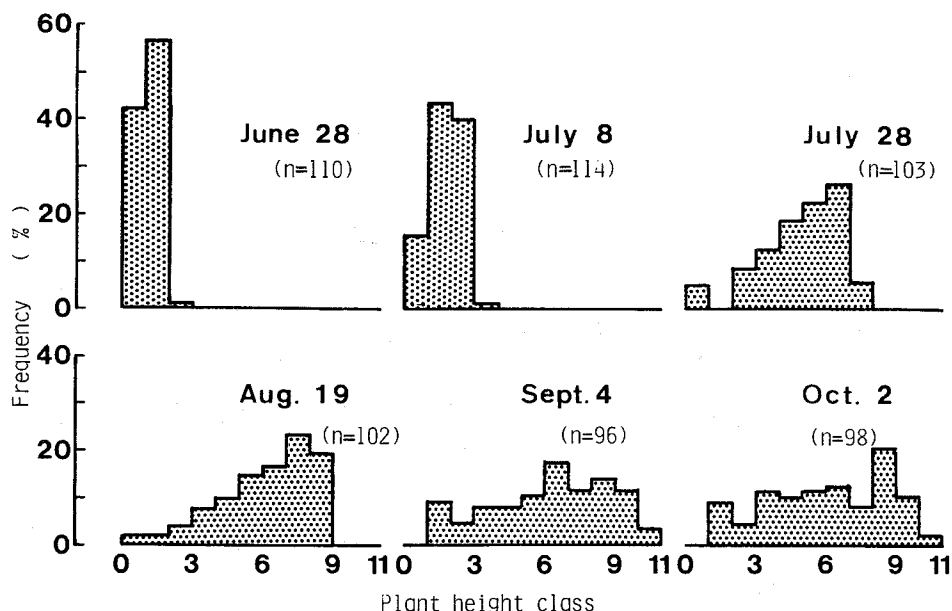


Figure 46. The plant height frequency histograms showing the seasonal change in the size structure of the natural unharvested population at Kojima lake. The plant height data are grouped into 10 cm classes (e.g. 0-1:  $0 < H \leq 10$  cm).

相当し、3～5月は収穫管理区の生育中期にあたる正規分布型になり、6～9月は自然放置区の生育中期と同じ型になる。10～12月は同区生育後期の分布型で、このように季節変化に伴う4相の分布型を認めている。

次に両地点の両処理区における相対伸長率 ( $\overline{RGR}$ ) の季節的变化を検討した。Fig. 47 に収穫管理区を示した。これによると、投入開始後、しばらくの間は  $\overline{RGR}$  が負の値になっているが、これは高密度で栽培していた植物体を占有面積の広い場に移したので重心をとる為、葉柄部が水平方向に広がり草高が低くなったことと、新子株が形成された結果、個体群としての草高平均値が低下したことに因る。その後、両地点共、 $\overline{RGR}$  は急上昇して被度が100%に達する直前に最高となっている。

7月中は10日毎に、8月からは15日毎に半量を収穫したことにより草高度数分布は正規分布を示しながら  $\overline{RGR}$  は徐々に低下した。Fig. 45 の10月2日の分布図ではモードが低い方に片寄る傾向を示し始めていたが、その頃から  $\overline{RGR}$  は負の値となり収穫前の草高まで回復できなかった様子を読みとれる。特に11月中旬の  $\overline{RGR}$  は最低値を示し、低温による急激な個体群の小型化が推

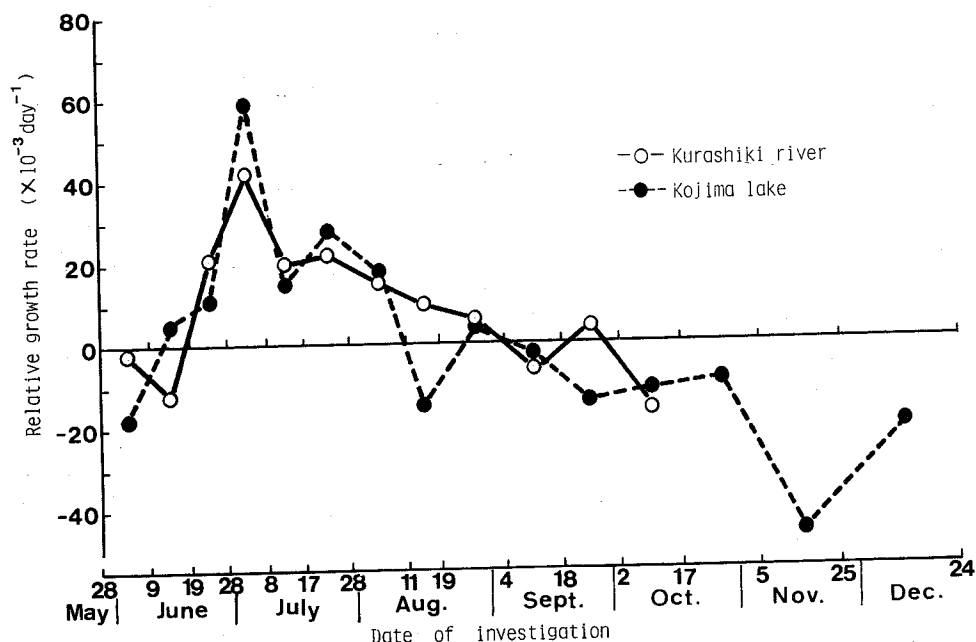


Figure 47. Seasonal variation in the relative growth rate for the average plant height in the periodically harvested population.

察された。

自然放置区でも収穫作業が加わるまでは、Fig. 48 に示す通り収穫管理区とはほぼ同じ傾向で、両地点共、最高個体群密度に達する直前に  $\overline{\text{RGR}}$  の最高値を有した。その後は、やはり徐々に低下したが、収穫作業が加わらないので  $\overline{\text{RGR}}$  の変化は小さく、Fig. 46 の階層構造を保ちながら安定した  $\overline{\text{RGR}}$  を維持した。10月上旬頃には垂直方向の生長はほぼ過飽和に達したと考えられる。

自然放置区、収穫管理区共に総合的に兎島湖の方が  $\overline{\text{RGR}}$  の変化が大きく、生長が倉敷川より速く、しかも生長が止まるのも速い傾向となったが、その原因が Inorg. -N と Org. -N の存在比や、 $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  の存在比が異なったことによるのか、現段階では明らかにできなかった。

これまでの個体群の構造解析から、個体数の動態と個体群の伸長生長が生育相を決定する重要な要因であることが推測されたので、個体群の平均草高と個体群密度との相関関係を Fig. 49 に示した。それによると、自然放置区の I のグループと収穫管理区の II のグループとそれ以外とに区分された。I のグループ

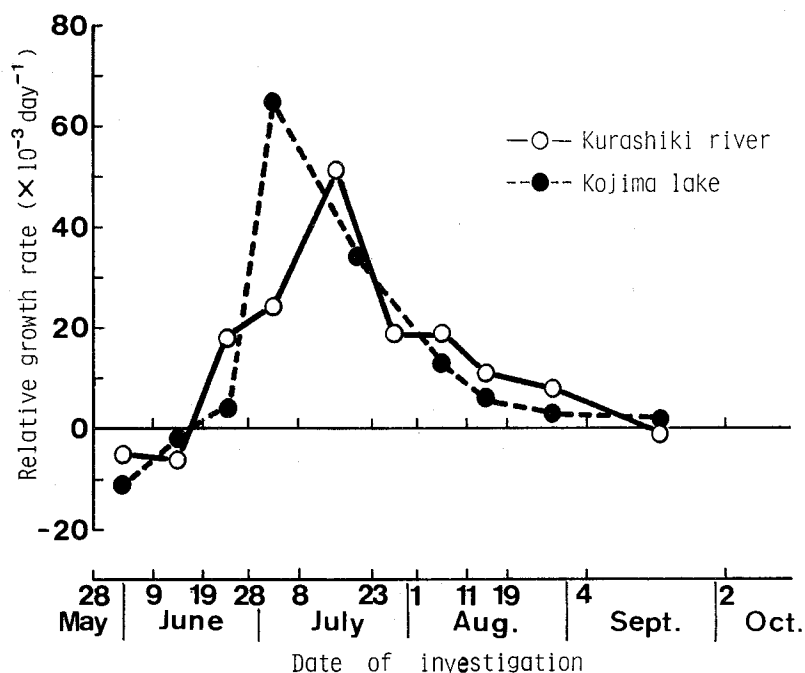


Figure 48. Seasonal variation in the relative growth rate for the average plant height in the natural unharvested population.

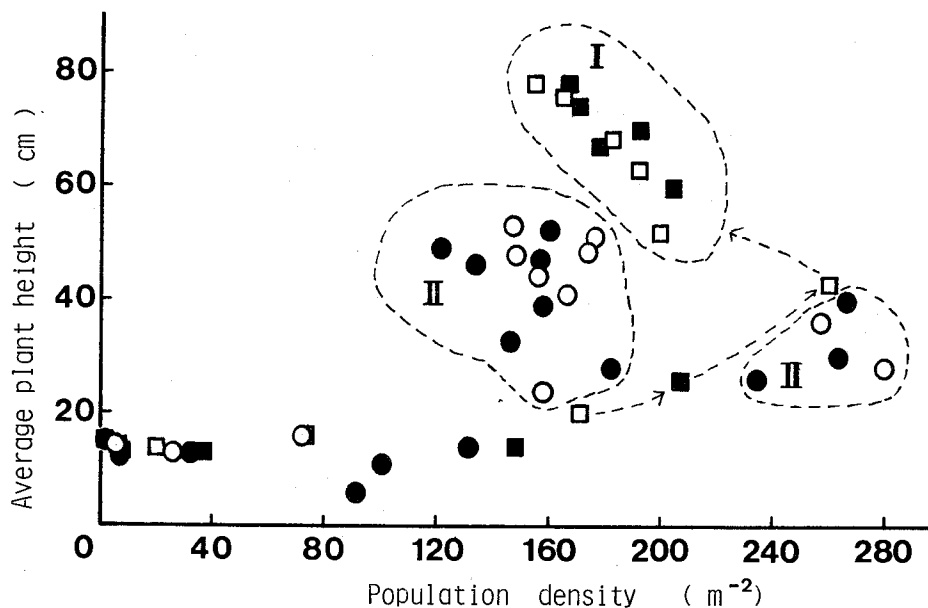


Figure 49. The relationship between the average plant height and the population density.  $\square$  represents the unharvested population at River,  $\blacksquare$ : the unharvested p. at Lake,  $\circ$ : the harvested p. at River and  $\bullet$ : the harvested p. at Lake, respectively.



プは密度の範囲が  $120 \sim 280/\text{m}^2$  で、平均草高が  $50 \sim 80 \text{ cm}$  内におさまっており、矢印方向に最高密度に達した後、右下から左上の方向に、つまり個体群が自己間引き現象を伴いながら伸長生長を行った様子が推察される。

一方、Ⅱのグループは、収穫管理を行ってからの個体群を表わしており、本調査の管理下では密度が  $120 \sim 280/\text{m}^2$ 、平均草高が  $25 \sim 55 \text{ cm}$  の範囲の個体群が維持されたと考えられる。その他のプロットは群落形成期か、あるいは低温に遭遇した後の個体群を表示している。

ところで、Center ら<sup>22)</sup>は、草丈  $45 \sim 55 \text{ cm}$  の個体が最も葉面積比率が高いので最大生長力を有すると報告しているが、本調査の自然放置区でも最高密度に達した後、自然間引きが生じ始めて生育相が変換する時期に平均草高が  $50 \text{ cm}$  となっており、今後検討を要する現象と考えられる。もし、Center らの説が肯定されれば、本調査の収穫管理区は、最も効率の良い個体群を維持したことになる。

以上より閉鎖系で個体群を生育させた場合、3つの生育相を経ることが明らかになった。すなわち第1期の生育相は群落が形成されるまでの時期で伸長生長より密度増加が優先される生育初期の段階である。第2期は、最高密度に達する直前の  $\overline{\text{RGR}}$  が最も高くなる時期から始まり、安定した伸長生長が行われる時期で、種内競争と外的環境要因のかねあいから個体群の大きさが決定される生育中期である。第3期は低温の影響から個体群の小型化が生じる生育後期の段階である。実際、自然状態では、個体群が未発達のまま低温に遭遇した場合は Fig. 45 に示した階層構造になり、一方、十分に発達した個体群では Fig. 46 の10月2日の変形分布型になることが予測される。このような個体群の生育過程は Boyd ら<sup>18)</sup>も認めており、その生育相を変換させる引き金は日照とそれに伴う気温、水温であろうと推察しているが、<sup>22)</sup>今後の追求が必要な点である。

なお、ホテイアオイ個体群を効率良く利用するには、生育中期の第2期を維持する方向に管理しなければならないことが示唆された。

#### (5) 現存量の変動

ホテイアオイの現存量を把握することは、本草を利用する場合、不可決な項目であるにも拘らず、我が国を含めた温帯地域での報告は極めて少ない。そこ

で自然水域における現存量の変動を個体群の生長や季節変化と対応させて検討してみよう。

まず、Fig. 50 に自然放置区の個体群生育初期における単位面積当たりの新鮮重の時間的変化を片対数紙上にプロットした。その結果、倉敷川、児島湖共に調査開始後約50日間は指数関数的生長を行い、指数関数型の生長曲線と相関係数  $r = 0.99$  の良い適合性を示した。倉敷川の相対生長率は  $0.106/\text{day}$ 、児島

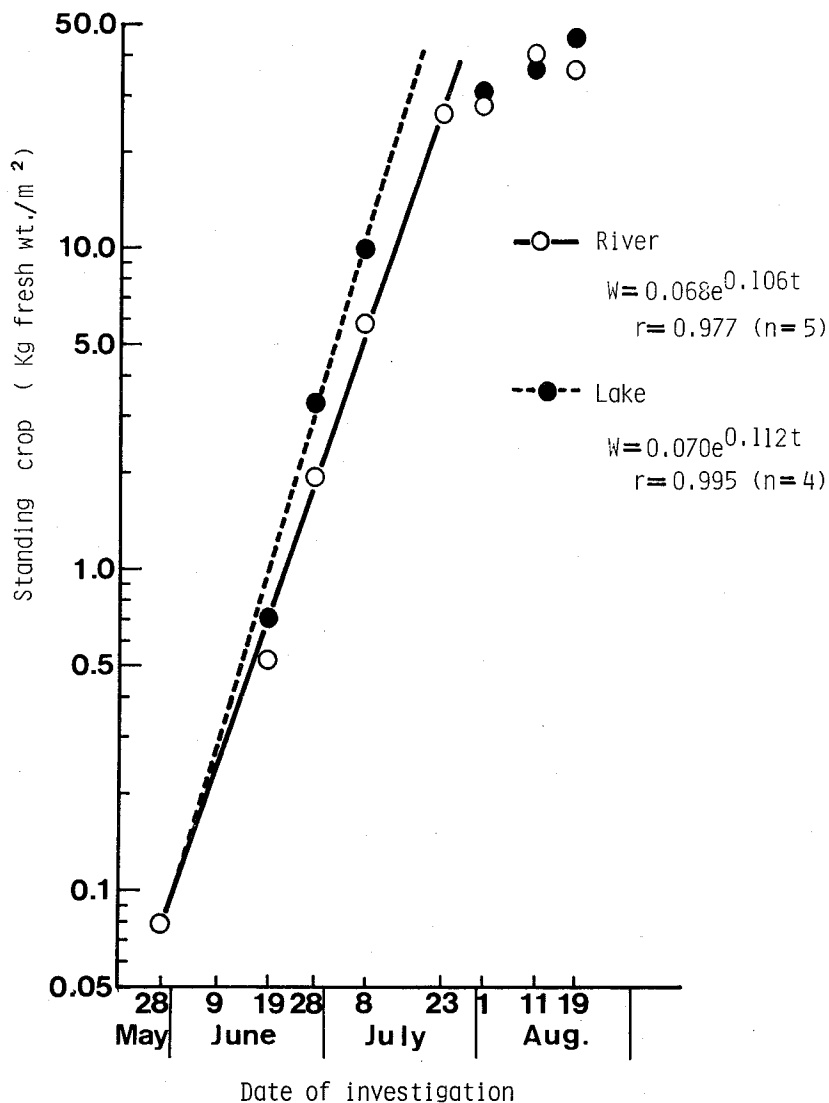


Figure 50. Exponential biological growth of waterhyacinth during the initial growth period in the natural unharvested population.

湖は0.112/dayであった。各調査区共、7月8日には被度が100%に達していたが、その時の現存量は6～10 kg fresh wt./m<sup>2</sup>で、その後も現存量が20～25 kg fresh wt./m<sup>2</sup>に達するまでは指数関数的生長が認められた。

また、Fig. 51は自然放置区の全生長過程を追跡したもので、個体群の生育初期には指数関数的に生長するが、生長が進むに伴い生長率が小さくなり、最終的には生長が止まる様子が明らかになった。ロジスチック曲線にあてはめると、倉敷川では上限値44 kg fresh wt./m<sup>2</sup>、積分定数476、生長係数0.11/dayの理論生長曲線と、また児島湖では上限値43 kg fresh wt./m<sup>2</sup>、積分定数380、生長係数0.11/dayの曲線と良く適合した。両地点の上限値や生長係数は近似であったが、これらの項目は栄養塩濃度、気象条件や初期条件に大きく左右されるので、この点に関しては環境条件を管理した実験的検討を要する。

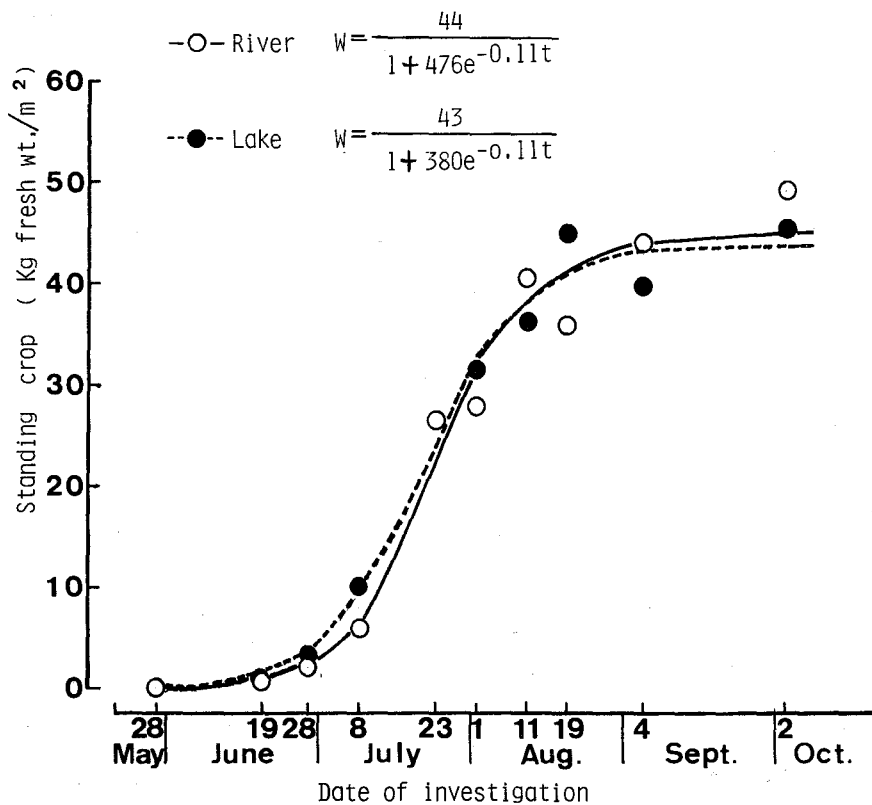


Figure 51. Change in the standing crop as fresh weight in the natural unharvested population.

一方、収穫管理区では7月8日から11月5日まで半量を収穫したので、各測定時における収穫前の現存量を経時的に Table 19 にまとめた。なお、どの時点においても現存量は  $20 \text{ kg fresh wt./m}^2$  以下であったので、各期間における個体群の生長は指数関数的生長曲線に適合すると考え、期間毎の相対生長率を求

Table 19. The standing crop as based on fresh weight and the relative growth rate in the periodically harvested population.

| Date    | River                |                      | Lake                 |                      |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|         | Standing crop        | Relative growth rate | Standing crop        | Relative growth rate |
|         | (kg/m <sup>2</sup> ) | (1/day)              | (kg/m <sup>2</sup> ) | (1/day)              |
| May 28  | 0.078                | 0.091                | 0.078                | 0.094                |
| June 19 | 0.581                | 0.139                | 0.621                | 0.168                |
| 28      | 2.025                | 0.110                | 2.813                | 0.123                |
| *July 8 | 6.085                | 0.142                | 9.600                | 0.052                |
| 17      | 10.910               | 0.110                | 7.680                | 0.143                |
| 28      | 18.330               | 0.048                | 18.450               | 0.044                |
| Aug. 11 | 17.950               | 0.065                | 17.080               | 0.056                |
| 19      | 15.140               | 0.042                | 13.350               | 0.045                |
| Sept. 4 | 14.860               | 0.048                | 13.610               | 0.063                |
| 18      | 14.640               | 0.072                | 16.380               | 0.020                |
| Oct. 2  | 20.040               | 0.030                | 12.410               | 0.034                |
| 17      | 15.815               | -                    | 10.390               | 0.038                |
| *Nov. 5 | -                    | -                    | 10.670               | 0.000                |
| 25      | -                    | -                    | 5.245                | -0.003               |
| Dec. 24 | -                    | -                    | 3.520                |                      |

All values represent an average for two replicates.

\* are expressed the period of 100% coverage of waterhyacinth. During this period, harvesting was conducted to provide 50% free surfave area.

On Nov. 25 and Dec. 24 plants were removed from one-fourth of the surface area.

めた。それによると、7月下旬までは高い相対生長率を示したが、その後は季節による差が生じなかった。これは前述したように今夏が例年にない冷夏で日照量が通年に比べて極めて少なかった為、8月以降のホテイアオイの生長に大きな影響を及ぼした結果と推察される。11月上旬に倉敷川では水鳥の食害に遭遇し、調査を中止せざるを得なかったが、11月上旬から明らかに低温による現存量の低下が児島湖で認められた。Sastroutomo ら<sup>119)</sup>は、千葉市内の自然水域で2月から3月の現存量は  $1.3 \text{ kg fresh wt./m}^2$  から  $0.13 \text{ kg fresh wt./m}^2$  であったと報告している。

自然放置区では9月から10月にかけて倉敷川で  $44 \sim 49 \text{ kg fresh wt./m}^2$  ( $1.84 \sim 2.06 \text{ kg dry wt./m}^2$ )、児島湖で  $40 \sim 45 \text{ kg fresh wt./m}^2$  ( $1.80 \sim 2.03 \text{ kg dry wt./m}^2$ ) の範囲の安定した現存量を示した。この値を他の地域と比較すると、フロリダ州で  $40.4 \sim 42.2 \text{ kg fresh wt./m}^2$ 、<sup>57)</sup> アラバマ州で  $2.13 \text{ kg dry wt./m}^2$  <sup>18)</sup>、ルイジアナ州で  $29 \text{ kg fresh wt./m}^2$  <sup>157)</sup> と報告されているので、ほぼ近い値を得ている。また、有用植物と比べるとトウモロコシやソルガムが  $1.0 \text{ kg} \sim 2.0 \text{ kg dry wt./m}^2$ 、バヒヤグラスやバーミューダグラスで  $0.7 \sim 1.5 \text{ kg dry wt./m}^2$  の生産量といわれている<sup>157)</sup>ので確かに本草の生産力は高いといえよう。

次に収穫管理区の各測定時における乾物生産量を Fig. 52 に表わした。破線は、収穫量を示している。これによると、今回の収穫管理では最大乾物生産量が倉敷川で  $788 \text{ g dry wt./m}^2$ 、児島湖で  $753 \text{ g dry wt./m}^2$  であった。破線部の総計、すなわち全収穫量は前者で  $2,672 \text{ kg dry wt./m}^2$  (7月8日～10月17日)、後者で  $2,791 \text{ kg dry wt./m}^2$  (7月8日～11月25日) であった。Westlake <sup>157)</sup> は、ホテイアオイならば1年間に有機物生産量として  $1.1 \sim 3.3 \text{ kg/m}^2$  を確保することは容易なことであろう提言している。また、生産速度の差異は実線部の傾きで推定されるが、倉敷川は  $11.73 \sim 40.91 \text{ g dry wt./m}^2/\text{day}$  (平均値  $27.87 \text{ g dry wt./m}^2/\text{day}$ )、児島湖は  $2.55 \sim 34.73 \text{ g dry wt./m}^2/\text{day}$  (平均値  $19.10 \text{ g dry wt./m}^2/\text{day}$ ) の範囲であった。フロリダ州で<sup>29)</sup> 1～2週間毎に常に  $500 \text{ g dry wt./m}^2$  の現存量に戻して収穫管理した結果、1年間の平均生産速度は  $24.2 \text{ g dry wt./m}^2$  を得ているが、我が国では児島湖の値から推定して、冬期の生産速度が急激に低下しているので、それだけの高い値は得られないと思われる。

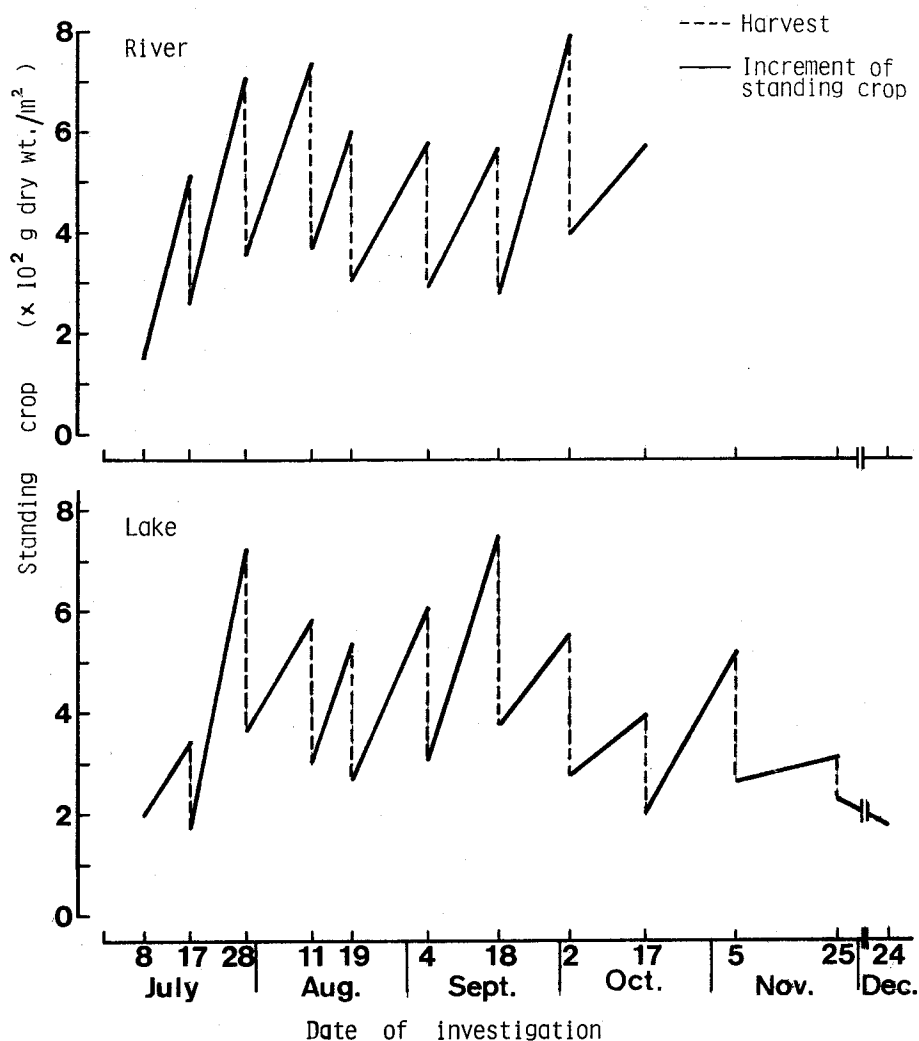


Figure 52. Change in the standing crop as dry weight in the periodically harvested population.

本調査では調査の性格上、自然放置区の生産速度が把握できなかったが、一般に  $7 \sim 25 \text{ g dry wt./m}^2/\text{day}$  の範囲におさまっている。<sup>15, 16, 19, 22, 102)</sup> 勿論、この値は季節、<sup>22)</sup> 密度、<sup>102)</sup> 水質、<sup>29, 162)</sup> などの環境要因に大きく依存することは述べるまでもない。

ここで留意しなければならないのは、生産速度と現存量との間に相関関係が低いということである。<sup>162)</sup> 生産速度が高い時、必ずしも現存量が大きいとは限らない。Debusk ら<sup>29)</sup> は、初期現存量が生産速度に与える影響を調べたところ、 $250 \sim 1500 \text{ g dry wt./m}^2$  の範囲では  $1000 \text{ g dry wt./m}^2$  付近で生産速度が最高

になったと報告している。

生産速度と共に現存量に影響を及ぼす要因として個体群密度が考えられる。そこで Fig. 53 に自然放置区及び収穫管理区における現存量と個体群密度との関係を示した。ところが、Fig. 53 は、個体群の平均草高と個体群密度との関係を示した Fig. 49 と同一の傾向を示した。つまり、自然放置区の I グループは矢印方向に最高密度に達した後、自己間引きを伴いながら伸長生長により現存量を増加させており、収穫管理区の II のグループは、今回の管理法では密度  $120 \sim 280/\text{m}^2$ 、現存量  $6 \sim 20 \text{ kg fresh wt.}/\text{m}^2$  の範囲で個体群を維持したことが明らかになった。その他のプロットは Fig. 49 の場合と同様である。このように伸長生長が現存量増加に促進的に作用している事実は、Boyd ら<sup>18)</sup> も認めている。

また、Wolverton ら<sup>160)</sup> は単に茎葉部の高さのみならず、根部の長さも加えた全長の方が、より現存量との相関が高いことを明らかにしている。

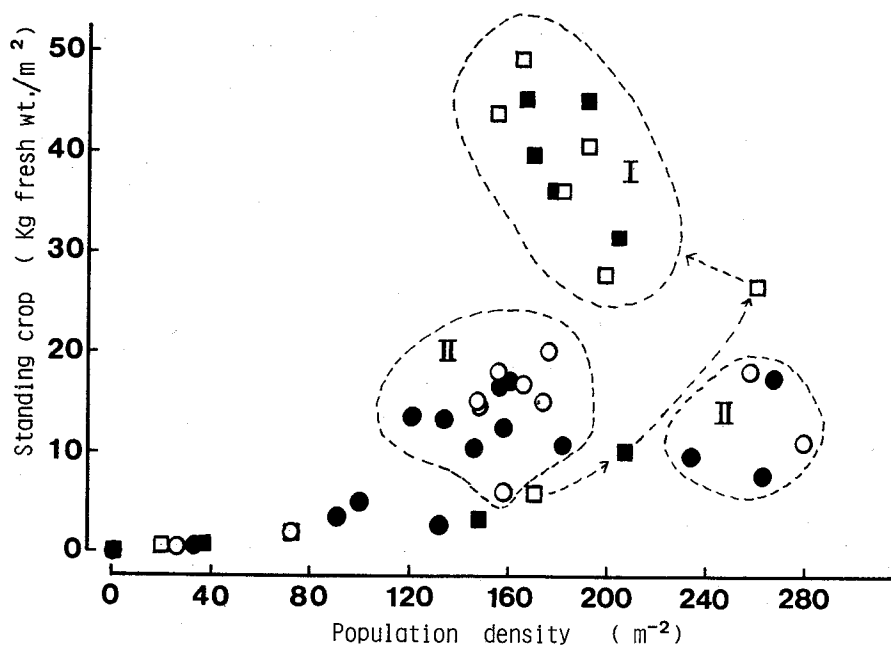


Figure 53. The relationship between the standing crop as fresh weight and the population density.  $\square$  represents the unharvested population at River,  $\blacksquare$ : the unharvested p. at Lake,  $\circ$ : the harvested p. at River and  $\bullet$ : the harvested p. at Lake, respectively.

# (6) 植物体内の窒素及びリン含有量

まず、第一処理区の最大増殖力を調査した時に得られた子株を分析し、葉期別に乾重に対する窒素及びリン含有率を Table 20～23 に表示した。ホテイアオイの場合、何葉までを幼株と定義づけるのかは非常に難しい。なぜならば2～3葉でも増殖能力は充分有しており、たとえストロンが切れても親株から独立して生育できるからである。しかし、Center<sup>22)</sup>らも認めているように5～6葉期に達した後、新葉と旧葉の交代がなされ、その後は安定して6～8葉を有するようになるので、その頃が幼株から成株へと変換する時期ではないかと思われる。従って、Table 20～23 に示した値は、すべて幼株の含有率と考えられる。一般に植物の体内成分を検討する場合、幼株の値は不安定な傾向を示すので避けるのだが、本草においては同一条件下で得られた他の処理区の成株は窒素で約2.6～3.6%、リンで約0.5～0.6%であったので両成分共に成株の値より極めて高い値を示したことになる。さらに、幼株内においても、倉敷川では窒素、リン共に全期間通じて期別に高い有意差があり、児島湖でも11月以降を除けば高い有意差が認められた。

Table 20. Nitrogen content of new plants at various leaf stage grown in Kurashiki river.

| River      | Date    |          |         |         |            |
|------------|---------|----------|---------|---------|------------|
| Leaf stage | June 9  | July 8   | Aug. 19 | Sept. 4 | Oct. 2     |
| 0.5        | 4.98 a  | 4.70 ab  | 4.88 a  | 5.04 a  | 5.41 a (%) |
| 1.0        | 4.99 a  | 4.99 a   | 4.49 a  | 4.39 c  | 5.17 ab    |
| 1.5        | 4.63 ab | 4.51 abc | 4.76 a  | 4.60 bc | 4.73 b     |
| 2.0        | 4.13 c  | 4.59 abc | 4.75 a  | 4.80 ab | 4.25 c     |
| 2.5        | 4.41 bc | 4.14 bc  | 4.79 a  | 3.99 d  | 4.15 c     |
| 3.0        | 4.39 bc | 4.10 bc  | 4.07 ab | 3.88 d  | 4.20 c     |
| 3.5        | -       | 4.07 c   | 3.96 ab | 3.96 d  | 4.03 c     |
| 4.0        | -       | -        | 3.34 b  | 3.77 de | -          |
| 4.5        | -       | -        | -       | 3.42 e  | -          |
| 5.0        | -       | -        | -       | 3.54 e  | -          |

Values in a column followed by the same letter are not significantly different at P=0.05 by Duncan's Multiple Range Test.



Table 21. Nitrogen content of new plants at various leaf stage grown in Kojima lake.

| Lake       | Date    |          |          |          |        |         |         |     |
|------------|---------|----------|----------|----------|--------|---------|---------|-----|
| Leaf stage | June 9  | July 8   | Aug. 19  | Sept. 4  | Oct. 2 | Nov. 5  | Nov. 25 | (%) |
| 0.5        | 4.98 ab | 5.09 a   | 4.13 abc | 3.72 abc | 5.00 a | 4.31 ab | 4.13 a  |     |
| 1.0        | 5.01 a  | 4.93 ab  | 4.38 a   | 3.82 abc | 4.57 b | 4.12 ab | 4.07 a  |     |
| 1.5        | 4.78 ab | 4.53 bcd | 3.93 abc | 3.55 bcd | 4.46 b | 4.05 ab | -       |     |
| 2.0        | 4.24 c  | 4.61 abc | 4.24 ab  | 4.44 a   | 4.17 c | 3.87 b  | 4.07 a  |     |
| 2.5        | 4.05 cd | 4.35 cde | 3.39 bc  | 3.84 ab  | 3.74 d | 4.33 ab | -       |     |
| 3.0        | 3.93 de | 4.01 de  | 3.89 abc | 3.50 bcd | 3.96 c | 4.44 a  | 4.73 b  |     |
| 3.5        | 3.82 de | 3.91 e   | 3.25 c   | 3.02 cde | 4.42 b | 4.24 ab | -       |     |
| 4.0        | 3.76 e  | 4.23 cde | -        | 2.81 de  | -      | -       | -       |     |
| 4.5        | -       | -        | -        | 2.57 e   | -      | -       | -       |     |

Values in a column followed by the same letter are not significantly different at P=0.05 by Duncan's Multiple Range Test.

Table 22. Phosphorus content of new plants at various leaf stage grown in Kurashiki river.

| River      | Date    |           |           |            |          |     |
|------------|---------|-----------|-----------|------------|----------|-----|
| Leaf stage | June 9  | July 8    | Aug. 19   | Sept. 4    | Oct. 2   | (%) |
| 0.5        | 0.804 a | 0.677 c   | 0.853 ab  | 0.780 abc  | 0.896 a  |     |
| 1.0        | 0.767 a | 0.843 a   | 0.812 abc | 0.751 abcd | 0.830 ab |     |
| 1.5        | 0.644 b | 0.748 abc | 0.843 ab  | 0.807 ab   | 0.776 ab |     |
| 2.0        | 0.557 b | 0.827 ab  | 0.865 a   | 0.853 a    | 0.714 bc |     |
| 2.5        | 0.581 b | 0.671 c   | 0.770 bcd | 0.735 abcd | 0.594 cd |     |
| 3.0        | 0.467 c | 0.646 c   | 0.752 cd  | 0.649 cde  | 0.653 cd |     |
| 3.5        | -       | 0.689 bc  | 0.716 de  | 0.676 bcde | 0.541 d  |     |
| 4.0        | -       | -         | 0.656 e   | 0.690 bcde | -        |     |
| 4.5        | -       | -         | -         | 0.589 e    | -        |     |
| 5.0        | -       | -         | -         | 0.637 de   | -        |     |

Values in a column followed by the same letter are not significantly different at P=0.05 by Duncan's Multiple Range Test.

Table 23. Phosphorus content of new plants at various leaf stage grown in Kojima lake.

| Lake       | Date     |           |          |          |          |          |         |     |
|------------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|---------|-----|
|            | June 9   | July 8    | Aug. 19  | Sept. 4  | Oct. 2   | Nov. 5   | Nov. 25 |     |
| Leaf stage |          |           |          |          |          |          |         |     |
| 0.5        | 0.746 ab | 0.949 a   | 0.805 a  | 0.781 ab | 0.813 a  | 0.754 a  | 0.712 a | (%) |
| 1.0        | 0.765 a  | 0.905 a   | 0.777 ab | 0.799 a  | 0.809 a  | 0.714 ab | 0.650 a |     |
| 1.5        | 0.674 bc | 0.830 ab  | 0.767 ab | 0.794 a  | 0.764 ab | 0.686 ab | -       |     |
| 2.0        | 0.596 cd | 0.817 abc | 0.803 a  | 0.751 ab | 0.707 bc | 0.656 b  | 0.585 a |     |
| 2.5        | 0.562 de | 0.656 d   | 0.720 ab | 0.734 ab | 0.649 c  | 0.582 c  | -       |     |
| 3.0        | 0.534 de | 0.741 bcd | 0.669 b  | 0.711 b  | 0.657 c  | 0.632 bc | 0.662 a |     |
| 3.5        | 0.494 e  | 0.622 d   | 0.558 c  | 0.577 c  | 0.663 c  | 0.552 c  | -       |     |
| 4.0        | 0.606 cd | 0.683 cd  | -        | 0.564 c  | -        | -        | -       |     |
| 4.5        | -        | -         | -        | 0.568 c  | -        | -        | -       |     |

Values in a column followed by the same letter are not significantly different at  $P=0.05$  by Duncan's Multiple Range Test.

収穫管理区における個体群の分析は Table 24 に示した通りである。倉敷川では、窒素及びリン含有率の季節的変化に有意差はなかったが、それに反して児島湖の方は期間が長かったので有意差が生じた。特にリンにおいて顕著であったが、これは水中のリン濃度の季節的変化に伴った結果と推察される。また両地点の調査期間中の平均含有率は両成分共に倉敷川の方が高かったが、これも主として水中の無機態成分に支配された為で、その成分濃度が倉敷川の方が高かったことに因る。

窒素及びリンの体内含有率は、本草を利用する場合、最も重要な指標となるので報告例も枚挙にいとまない。もっとも栄養塩類の水中濃度や植物体の生育相により、その値は大きく変動するのであるが、<sup>84)</sup> ほぼ窒素は 1.33~3.33%、リンは 0.14~0.80% の範囲内にある。<sup>17)</sup> 従って、本調査で得た含有率は比較的高かったと推察される。

さて次に、収穫管理区における窒素及びリンの体内含有率と現存量を把握したので、各調査時点に個体群によって固定された各々の成分の蓄積量を算出してみた。各月の代表値を Fig. 54 に示したが 7 月 8 日以外は窒素、リン共に倉敷川の方が蓄積量が多かった。これは含有率よりも、むしろ現存量の差異によるものと考えられる。窒素は倉敷川で 27.34 g/m<sup>2</sup>、児島湖で 20.67 g/m<sup>2</sup> の最大

Table 24. Contents of nitrogen and phosphorus ( % dry weight ) in waterhyacinths in the periodically harvested population.

|             |    | River     |   |             |    | Lake      |     |             |   |
|-------------|----|-----------|---|-------------|----|-----------|-----|-------------|---|
| Date        |    | Nitrogen  |   | Phosphorus  |    | Nitrogen  |     | Phosphorus  |   |
|             |    | (%)       |   |             |    |           |     |             |   |
| July        | 8  | 3.65      | a | 0.697       | ab | 3.53      | a   | 0.763       | a |
| Aug.        | 11 | 3.46      | a | 0.743       | a  | 3.46      | ab  | 0.783       | a |
| Sept.       | 4  | 3.71      | a | 0.754       | a  | 2.62      | c   | 0.572       | b |
| Oct.        | 2  | 3.47      | a | 0.591       | b  | 3.10      | abc | 0.484       | c |
| Nov.        | 5  | -         |   | -           |    | 2.69      | c   | 0.322       | d |
| Nov.        | 25 | -         |   | -           |    | 2.97      | bc  | 0.316       | d |
| Dec.        | 24 | -         |   | -           |    | 3.09      | abc | 0.292       | d |
| Average     |    |           |   |             |    |           |     |             |   |
| (July-Oct.) |    | 3.57±0.13 |   | 0.696±0.074 |    | 3.18±0.42 |     | 0.651±0.146 |   |
| (July-Dec.) |    | -         |   | -           |    | 3.06±0.35 |     | 0.505±0.210 |   |

Values having the same letter in each column are not significantly different at the 5% level by Duncan's Multiple Range Test.

値を示し、リンのそれは前者で  $5.45 \text{ g/m}^2$ 、後者で  $4.68 \text{ g/m}^2$ であった。また、調査期間中に収穫した乾物は前述した通り倉敷川で  $2.672 \text{ kg/m}^2$ 、児島湖で  $2.791 \text{ kg/m}^2$ であったので、Table 24 の平均含有率を乗じることにより前者では窒素が  $95.39 \text{ g/m}^2$ 、リンが  $18.60 \text{ g/m}^2$ 、後者では窒素が  $85.40 \text{ g/m}^2$ 、リンが  $14.09 \text{ g/m}^2$  固定され、かつ除去されたと試算できる。

一方、自然放置区の場合を考えてみよう。調査終了時の10月2日で収穫すると仮定すると、その時期にはほぼ最大の乾物量を得ており、また平均含有率は部

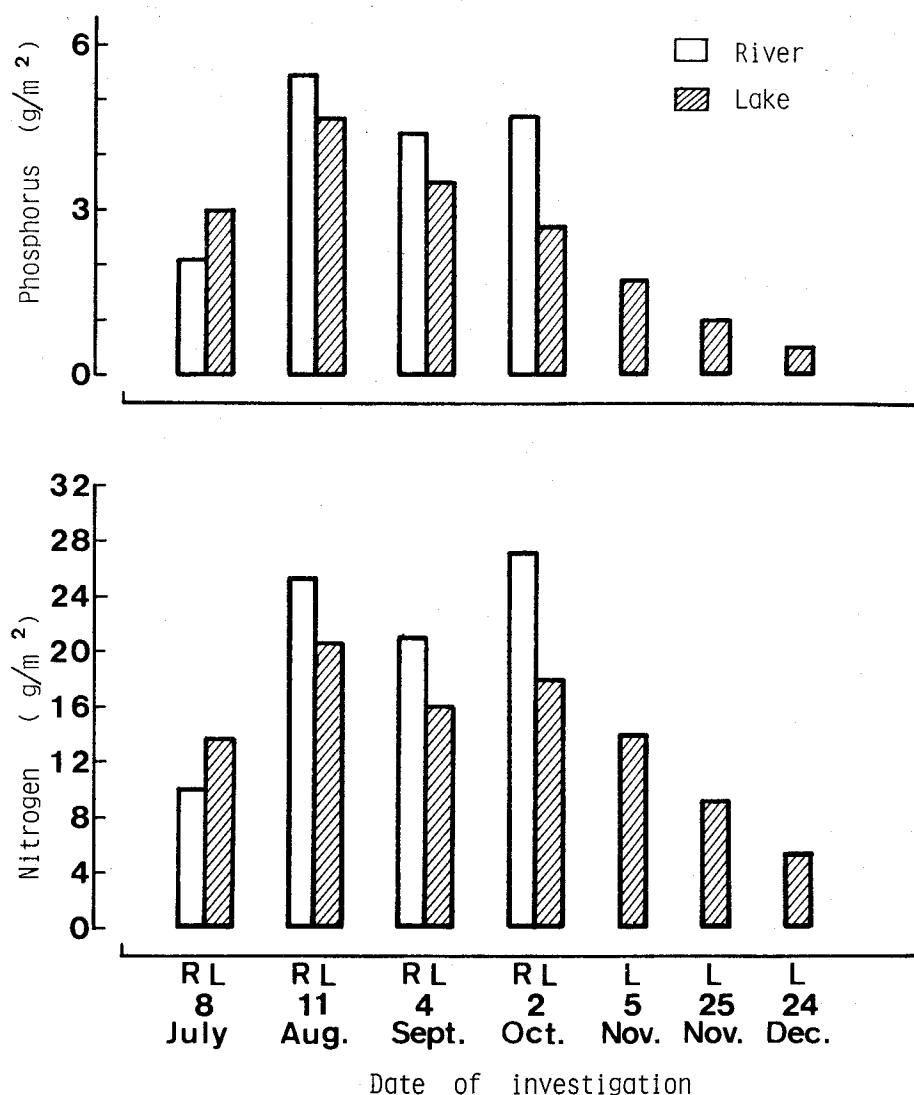


Figure 54. Accumulation of nitrogen and phosphorus by waterhyacinths in the periodically harvested population.

位別に倉敷川で窒素が茎葉部：2.71%、根部：2.16%、リンが茎葉部：0.568%、根部：0.324%であったので窒素としては77.53 g/m²、リンとしては15.74 g/m²固定されたことになる。同様に児島湖の方も試算すると、両成分共、含有率がやや低い為、窒素で66.40 g/m²、リンで12.55 g/m²の値となった。フロリダ州で行われた自然状態での同様の試算では、窒素が42 g/m²、リンが14.83 g/m²と報告されており、<sup>57)</sup> またアラバマ州では5月から9月まで生育させて窒

素は  $50 \text{ g/m}^2$ 、リンは  $6 \text{ g/m}^2$  の値を得ている。<sup>19)</sup> これら他の地域と比較すると、本調査では高い値を得ており、また季節的に後1ヶ月ほどは生育可能であることから年間のホテイアオイによる蓄積量は、さらに過大評価が許され则认为る。

## 第2節 水系別生産量と窒素及びリン吸収能

本節は、毎年、越冬個体が存在し、夏期に大繁茂を引き起こす発生源地区と推定されている水系を含めて、水質の異なる3水系でホテイアオイを生育させ、生産量と水質との関係を明らかにしようとするものである。また、生育盛期の生産量と秋期から冬期における生育状況を把握すると共に、前節に引き続き、有効利用への基礎研究も兼ねて、本草の窒素及びリン吸収能を検討する。

### 1. 実験材料及び方法

A地点：六間川松島、B地点：川崎病院北、C地点：六間川松山の3地点を調査地とした。A及びC地点は、灌漑用の小さな川で両地点は約3km離れており、A地点は住宅地に近い所を流れ、改修工事により河岸はコンクリートで固められ、川幅もC地点より広く水量も豊かである。それに対してC地点は分水嶺で、農耕地を蛇行しており水深も浅く、特に10月以降は約15cmであった。B地点は、灌漑用排水路である。

上記3地点に1.5m四方の木枠を設置し、A地点は9月6日、B及びC地点は8月13日に調査を開始した。葉数7～7.5枚、新鮮重約100gの成株2株を各々の木枠に投入し、その後、生育盛期には10日毎、10月中旬以降は3～4週間毎に木枠内の繁殖状況を調査した。調査項目は、被度・株数・葉数・草高・新鮮重・乾物重及び水質一般項目(水温・pH・EC・窒素・リン・Cl・COD・SS・DO)とした。なお、新鮮重及び乾物重測定は、群落形成期に影響を及ぼさないよう被度が100%近くになってから実施し、被度100%に達した後は、調査後、常に3分の1量ずつ本草を引きあげ収穫した。乾物は窒素とリンの分析用に供試し、窒素はガンニング変法、リンはアスコルビン酸変法で測定した。

## 2. 実験結果及び考察

### (1) 調査地の水質特性

調査期間中の各調査地点の水質分析結果を Table 25-1、25-2 及び 25-3 に示した。また、ホテイアオイの生育や水質浄化に関係が深いと考えられる項目のみとりあげて、Fig. 55-1 及び Fig. 55-2 に表わした。3 地点の水質を比較すると、 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度、 $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度、COD 及び EC は B 地点が相対的に高く、水質汚濁の進んだ地点と考えられる。実際、B 地点は付近の病院や工場の温排水が流入するところで、冬期も水温は  $10^\circ\text{C}$  以上を保ち、越冬株が多数存在する場所である。また、底泥はホテイアオイの腐敗物の蓄積からヘドロ化している。

一方、A 及び C 地点との水質の差は、あまり認められなかったが、溶存酸素が C 地点で高かったことが認められた。また、栄養塩類の季節変化は、採水回数が少ないので明瞭ではなかったが、12 月から 1 月にかけて、やや増加の傾向がみられた。

Table 25-1. Seasonal change in water quality at location A.

| Location A |                |               |                    |                    |               |                    |               |               |               |               |               |               |
|------------|----------------|---------------|--------------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Date       | Water Temp.    | pH            | NH <sub>4</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N | K-N           | PO <sub>4</sub> -P | T-P           | Cl            | COD           | SS            | EC            | DO            |
|            | (C)            |               | (mg/l)             | (mg/l)             | (mg/l)        | (mg/l)             | (mg/l)        | (mg/l)        | (mg/l)        | (mg/l)        | (μv)          | (mg/l)        |
| Aug. 13    | 34.0           | 9.60          | 0.11               | 0.00               | 2.91          | 0.14               | 0.33          | -             | 12.0          | 12.0          | 182           | 6.56          |
| 24         | 28.4           | 6.74          | -                  | -                  | -             | -                  | -             | -             | -             | -             | 231           | 2.00          |
| Sept. 6    | 24.8           | 6.80          | 0.48               | 0.54               | 2.56          | 0.22               | 0.31          | 18.0          | 5.7           | 18.0          | 224           | 2.20          |
| 17         | 24.3           | 7.30          | 0.47               | 0.22               | -             | -                  | 0.16          | 5.8           | 2.2           | 9.6           | 188           | 2.05          |
| 26         | 25.2           | 7.23          | -                  | -                  | -             | -                  | -             | -             | -             | -             | 192           | 3.40          |
| Oct. 9     | 17.5           | 6.75          | 0.27               | 0.60               | 1.25          | -                  | 0.22          | 16.0          | 3.3           | 17.0          | 222           | -             |
| 25         | 17.3           | 6.88          | -                  | -                  | -             | -                  | -             | -             | -             | -             | 376           | 1.33          |
| Nov. 16    | 9.4            | 6.65          | 0.75               | 1.03               | -             | 0.14               | 0.23          | 23.0          | 3.2           | 12.0          | -             | 2.18          |
| Dec. 14    | 8.2            | 7.25          | 0.47               | 0.73               | 1.09          | 0.13               | 0.24          | 17.0          | 2.9           | 11.0          | -             | 2.17          |
| Jan. 29    | 12.0           | -             | 1.64               | 1.05               | 3.96          | 0.78               | 1.12          | 30.0          | 9.0           | 8.6           | -             | -             |
| Average    | 20.11<br>±8.59 | 7.25<br>±0.92 | 0.60<br>±0.50      | 0.60<br>±0.39      | 2.35<br>±1.20 | 0.28<br>±0.28      | 0.37<br>±0.33 | 18.3<br>±8.03 | 5.47<br>±3.70 | 12.6<br>±3.58 | 231<br>±66.99 | 2.72<br>±1.65 |

Table 25-2. Seasonal change in water quality at location B.

| Location B |             |       |                    |                    |        |                    |        |        |        |        |            |        |
|------------|-------------|-------|--------------------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|------------|--------|
| Date       | Water Temp. | pH    | NH <sub>4</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N | K-N    | PO <sub>4</sub> -P | T-P    | Cl     | COD    | SS     | EC         | DO     |
|            | (C)         |       | (mg/l)             | (mg/l)             | (mg/l) | (mg/l)             | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | ( $\mu$ v) | (mg/l) |
| Aug. 13    | 32.0        | 7.02  | 0.22               | 1.65               | 3.13   | 0.39               | 0.61   | 19.0   | 6.5    | 8.5    | 251        | 1.90   |
| 24         | 29.2        | 6.60  | -                  | -                  | -      | -                  | -      | -      | -      | -      | 358        | 1.37   |
| Sept. 6    | 25.8        | 6.85  | 0.72               | 1.44               | 1.99   | 0.32               | 0.46   | 19.0   | 6.0    | 17.0   | 312        | 2.00   |
| 17         | 24.8        | 7.25  | 0.58               | 1.70               | -      | -                  | 1.40   | 13.0   | 3.9    | 13.0   | 253        | 1.55   |
| 26         | 25.6        | 6.78  | -                  | -                  | -      | -                  | -      | -      | -      | -      | 262        | 0.96   |
| Oct. 9     | 22.6        | 7.42  | 1.64               | 0.00               | 2.63   | -                  | 0.50   | 31.0   | 13.0   | 60.0   | 416        | -      |
| 25         | 21.5        | 6.65  | 5.02               | 0.20               | -      | 1.16               | 1.49   | 33.0   | 7.0    | 10.0   | 390        | 0.86   |
| Nov. 16    | 16.4        | 6.55  | 1.24               | 1.70               | -      | 1.20               | 1.53   | 28.0   | 6.6    | 11.0   | -          | 1.95   |
| 20         | 16.5        | 6.80  | 1.99               | 2.10               | 4.77   | 0.64               | 1.35   | 28.0   | 15.0   | 22.0   | 287        | -      |
| Dec. 14    | 10.3        | 6.68  | 5.76               | 1.56               | -      | 0.74               | 0.89   | 22.0   | 24.0   | 10.0   | -          | 0.43   |
| Jan. 29    | 15.8        | -     | 4.09               | 0.96               | 8.46   | 2.33               | 2.66   | 31.0   | 13.0   | 12.0   | -          | -      |
| Average    | 21.8        | 6.80  | 2.36               | 1.26               | 4.20   | 0.97               | 1.21   | 24.89  | 10.56  | 17.94  | 306        | 1.45   |
|            | +6.86       | +0.22 | +2.06              | +0.72              | +2.60  | +0.69              | +0.70  | +6.88  | +6.35  | +16.19 | +61.87     | +0.58  |

Table 25-3. Seasonal change in water quality at location C.

| Location C |             |       |                    |                    |        |                    |        |        |        |        |            |        |
|------------|-------------|-------|--------------------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|------------|--------|
| Date       | Water Temp. | pH    | NH <sub>4</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N | K-N    | PO <sub>4</sub> -P | T-P    | Cl     | COD    | SS     | EC         | DO     |
|            | (C)         |       | (mg/l)             | (mg/l)             | (mg/l) | (mg/l)             | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | ( $\mu$ v) | (mg/l) |
| Aug. 13    | 30.2        | 7.10  | 0.43               | 0.36               | 2.77   | 0.15               | 0.25   | 12.0   | 2.6    | 36.0   | 43         | 3.38   |
| 24         | 28.4        | 6.85  | -                  | -                  | -      | -                  | -      | -      | -      | -      | 185        | 4.78   |
| Sept. 6    | 24.2        | 6.90  | 0.31               | 0.44               | 2.56   | 0.28               | 0.37   | 15.0   | 6.1    | 27.0   | 179        | 4.60   |
| 17         | 24.2        | 7.30  | 0.71               | 0.24               | -      | -                  | 0.37   | 6.7    | 1.4    | 28.0   | 192        | 1.64   |
| 26         | 25.0        | 6.70  | -                  | -                  | -      | -                  | -      | -      | -      | -      | 198        | 3.57   |
| Oct. 9     | 17.2        | 6.82  | 0.39               | 0.15               | 1.73   | -                  | 0.31   | 18.0   | 3.9    | 10.0   | 278        | -      |
| 25         | 20.5        | 7.05  | -                  | -                  | -      | -                  | -      | -      | -      | -      | 198        | 2.50   |
| Nov. 16    | 7.5         | 6.40  | 0.43               | 0.88               | -      | 0.18               | 0.25   | 18.0   | 2.9    | 38.0   | -          | 3.95   |
| Dec. 14    | 9.2         | 7.20  | 0.11               | 0.48               | 1.84   | 0.04               | 0.06   | 4.7    | 1.3    | 3.7    | -          | 7.02   |
| Jan. 29    | 12.5        | -     | 0.51               | 0.44               | 1.71   | 0.21               | 0.38   | 22.0   | 7.2    | 12.0   | -          | -      |
| Average    | 19.89       | 6.92  | 0.41               | 0.43               | 2.12   | 0.17               | 0.28   | 13.7   | 3.6    | 22.1   | 182        | 3.93   |
|            | +7.97       | +0.28 | +0.18              | +0.23              | +0.50  | +0.09              | +0.11  | +6.33  | +2.27  | +13.49 | +69.72     | +1.62  |

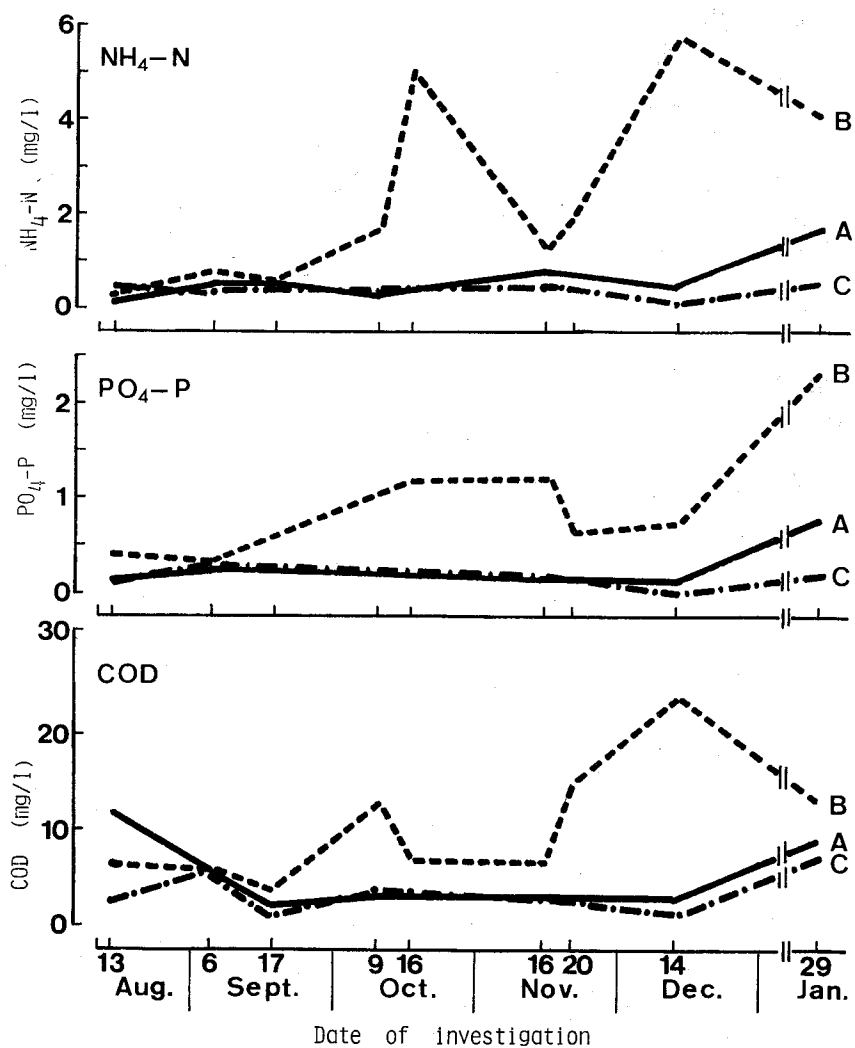


Figure 55-1. Seasonal change in ammonium nitrogen, inorganic phosphate and COD in three locations.

調査期間中の岡山県の旬間気温及び日照時間を Fig. 56 に示したが、気温に関して概況を述べると、9月上旬は平年より少し低いが、中、下旬及び10月から11月上旬までは例年になく暖かい日が続き、特に11月上旬は最低気温が非常に高かった。11月中旬に一時冬型の気圧配置となり14日に初氷、15日に初霜がおりた。その後は、平年より暖かい日が続き1月中旬に冷え込みが厳しくなった。



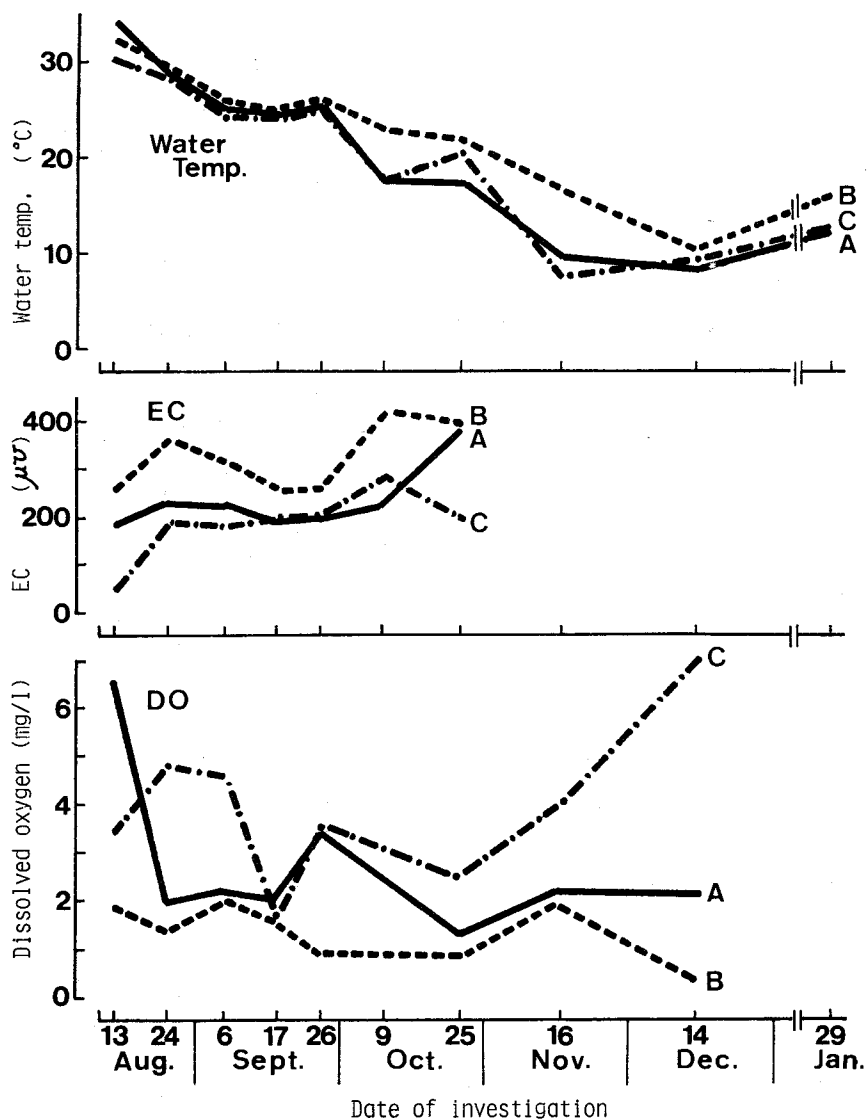


Figure 55-2. Seasonal change in water temperature, electric conductivity and dissolved oxygen in three locations.

## (2) 個体数の動態

各調査地点における群落形成期の増殖の様子をFig. 57 に示したところ、低密度期は、いずれの地点でも指数関数的生長が認められた。相対増殖率はA地点が0.115、B地点が0.154、C地点が0.148でB地点が最も高かった。前節では群落形成期における現存量の増加に指数関数的生長を認めたが個体数の増加においても、被度が100%に達するまでは同様の傾向が示された。また、調査期間

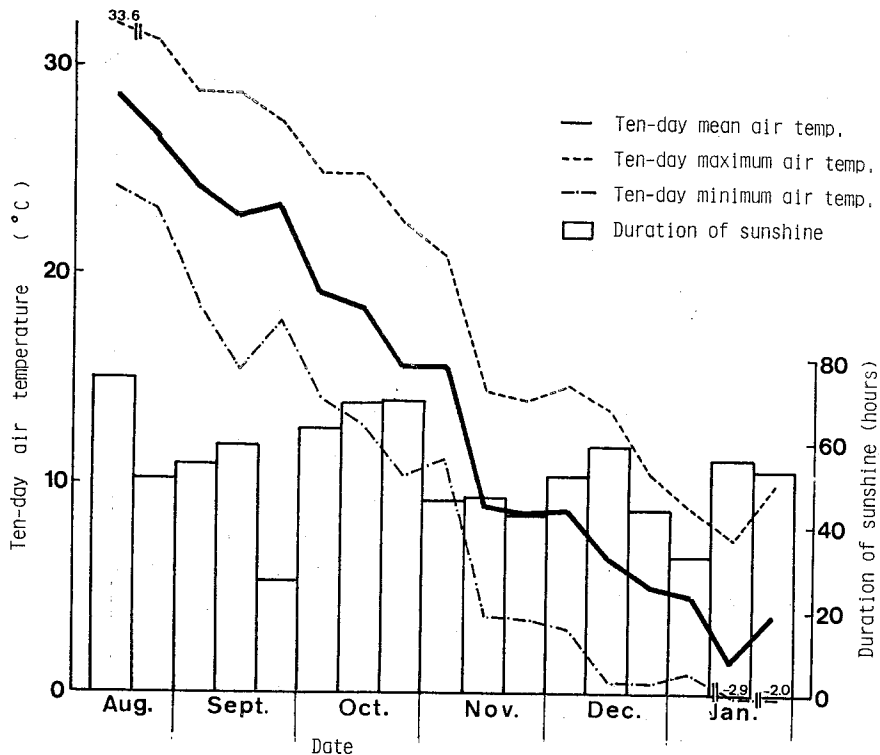


Figure 56. Seasonal change in the ten-day air temperature and the duration of sunshine in Okayama.

中の増殖の状況をTable 26にまとめたが、A地点のみ9月6日に投入した為、他の2地点と異なる増殖をみせた。Fig. 57で相対増殖率が最も低かったことが示されたが、被度100%になるまでに約50日を要し、個体数は3地点の中で最も多いにも拘らず個体重は小さく草高も低い小型の株となった為、生産量は少なかった。この現象は他の地点より試験開始日が遅れたことによるのか、水系の差によるのか明らかではない。

一方、B地点はC地点より初期の個体数増加が速く、被度100%に達するのにB地点で35日、C地点で45日を要した。しかし、その後、個体数はC地点の方が多くなり、平均個体重及び草高も優れた。B地点で被度100%後に増殖や生長が抑制されたのは、Table 25-2に示したように溶存酸素が総体的に低かったこと、電気伝導度が高く生長阻害物質流入の可能性が高いこと、懸濁物が多く、根に付着し、その結果、根の吸収能力が低下したことに起因すると推察される。そのことは、B地点で採取したホテイアオイ中の金属元素量を分析したところ、バリウムや水銀等が異常に高い値を示したことから推察される。これより、窒素

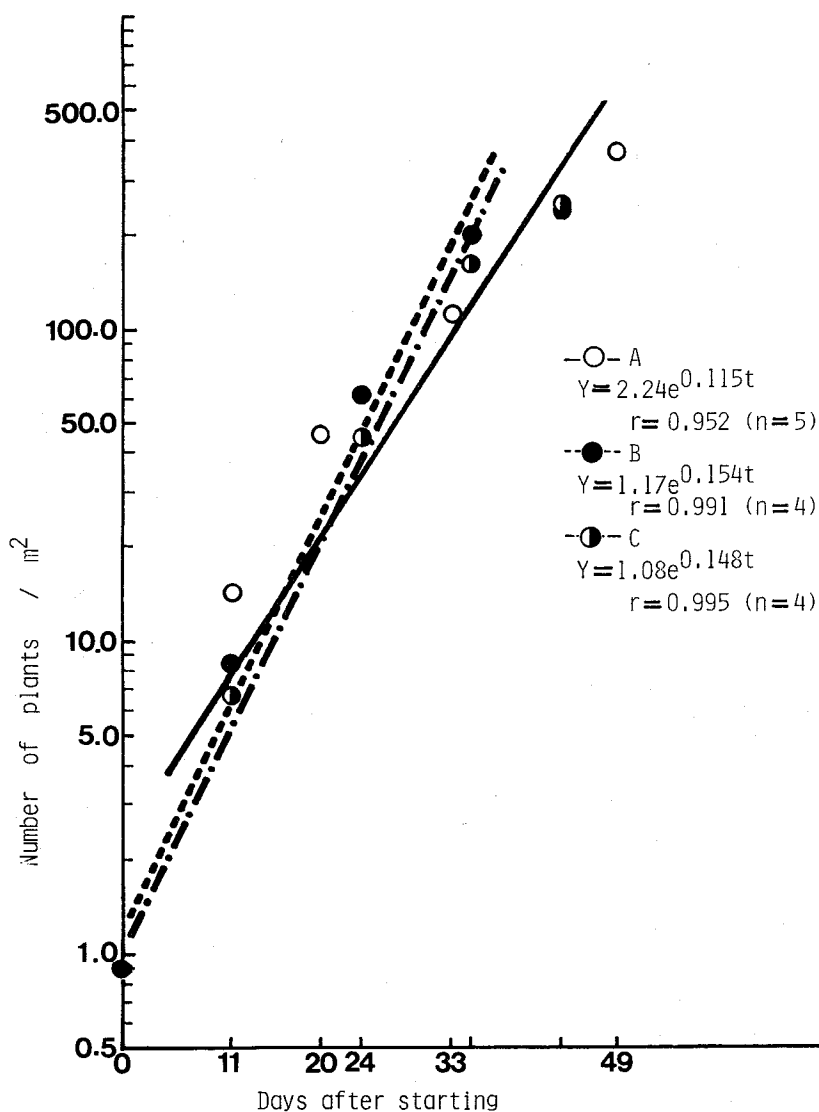


Figure 57. Exponential biological growth of waterhyacinth for the number of plants during the initial growth period in three locations.

やリンなどの栄養塩類濃度が高ければ必ずしも増殖や生育が良好であるとは限らず、有機廃水が流入する場合、溶存酸素が問題になるとの報告もあり、<sup>56)</sup> 汚濁度の高い水系では他の要因も充分に考慮しなければならないことが示唆された。相対増殖率は3地点共、被度100%に達するまでは高いが、高密度になると急激に低下し、密度要因が増殖に大きく依存していることが明らかであった。

Table 26. The relative growth rate ( $\overline{\text{RGR}}$ ) and the doubling time in days for the number of plants in three locations.

| Date    | Location A                      |             |                    | Location B                      |             |                    | Location C                      |             |                    |
|---------|---------------------------------|-------------|--------------------|---------------------------------|-------------|--------------------|---------------------------------|-------------|--------------------|
|         | Number of plants/m <sup>2</sup> | RGR (1/day) | Doubling time(day) | Number of plants/m <sup>2</sup> | RGR (1/day) | Doubling time(day) | Number of plants/m <sup>2</sup> | RGR (1/day) | Doubling time(day) |
| Aug. 13 | -                               | -           | -                  | 0.89                            |             |                    | 0.89                            |             |                    |
| 24      | -                               | -           | -                  | 8.44                            | 0.205       | 3.39               | 6.67                            | 0.183       | 3.79               |
| Sept. 6 | 0.89                            | -           | -                  | 61.33                           | 0.180       | 4.54               | 45.33                           | 0.148       | 4.70               |
| 17      | 14.22                           | 0.252       | 2.75               | *195.11                         | 0.105       | 6.59               | 159.11                          | 0.114       | 4.97               |
| 26      | 45.78<br>(40.44)                | 0.130       | 5.30               | *239.11<br>(233.78)             | 0.019       | 30.68              | *248.00<br>(242.67)             | 0.049       | 14.03              |
| Oct. 9  | 106.22<br>(84.99)               | 0.074       | 9.30               | *270.67<br>(180.44)             | 0.011       |                    | *328.00<br>(218.67)             | 0.023       | 30.58              |
| 25      | *348.00<br>(232.00)             | 0.088       | 9.26               | *200.00<br>(133.33)             | 0.006       |                    | *296.00<br>(197.33)             | 0.019       |                    |
| Nov. 16 | *452.00<br>(301.33)             | 0.030       | 22.86              | *292.00<br>(194.67)             | 0.036       |                    | *412.00<br>(274.67)             | 0.034       |                    |
| Dec. 14 | *304.00<br>(202.67)             | 0.0003      |                    | *204.00<br>(136.00)             | 0.002       |                    | *276.00<br>(184.00)             | 0.0002      |                    |
| Jan. 29 | 42.22                           | 0.000       |                    | 205.70<br>(136.89)              | 0.009       |                    | 214.67                          | 0.003       |                    |
| Mar. 1  | -                               | -           | -                  | 81.78                           | 0.000       |                    |                                 |             |                    |

また、群落形成期の個体数の倍加日数をもとめたところ、8月から9月では被度50%までは1週間以内であった。前節で6月に同様の倍加日数を求めたところ同じ傾向を示したので、季節より密度に依存すると考えられる。被度が100%近くになると約1ヶ月を要している。

本年は、晩秋より初冬にかけて平年より比較的温暖であった為、葉身の低温障害が認められたのは12月中旬以降であった。そして、翌年の1月29日の調査では、A地点は全株枯死、B地点は全株生存、C地点は約4割枯死と各地点の越冬状況に差が生じ始め、結局、3月まで生存株が残っていたのは、B地点のみとなった。ここでは採取株の約2割が枯死していた程度で、温排水流入の影響が明らかに認められた。

次に各時期の個体群中の幼株数を測定した結果をFig. 58に示した。幼株は、葉数4枚未満とした。それによるとA地点は被度100%後も幼株が多く存在し小型の株が多かったのに対し、B地点は密度が高くなると急激に幼株が少なくなり、全体の個体数増加がやや抑制された傾向を示した。しかし、11月16日以降は幼株の増加が認められた。C地点もB地点と同様の傾向だが、10月25日以降は安定した幼株数を確保している。このように、11月頃、幼株数が増加する

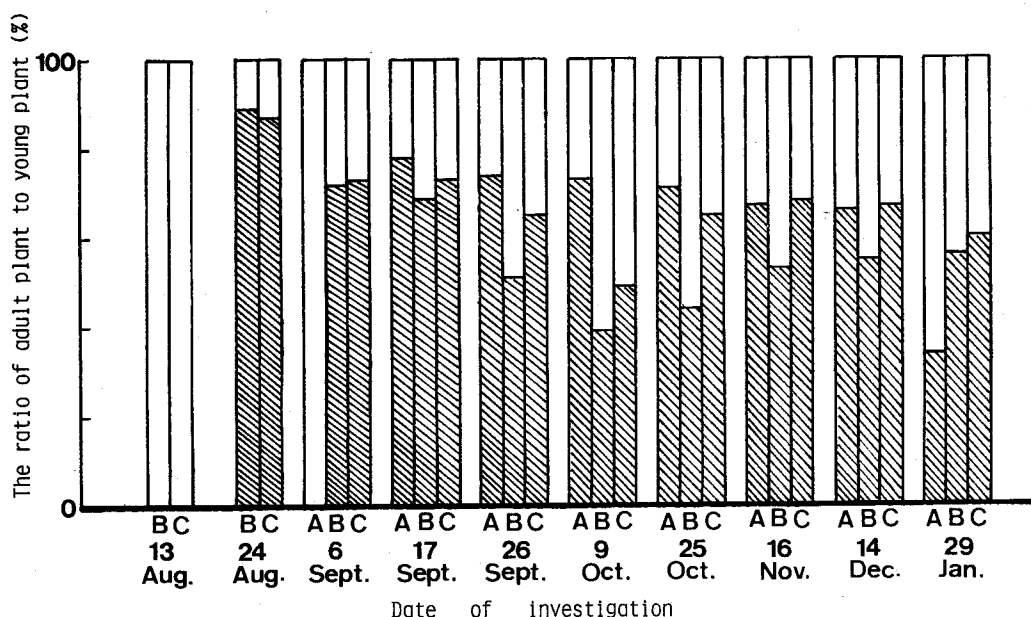


Figure 58. Variation in the ratio of adult plant to young plant. Young plant represents small plant less than four leaves. □ : Adult plant, ▨ : Young plant.

ことは、一般の自然水域で観察されることで、約15℃～20℃の水温で、一時子株形成が盛んになる。<sup>89)</sup>

### (3) 現存量の変化

被度100%後の調査時の現存量を乾物重でFig. 59に示した。各地点共、11月16日に最大の現存量を得た。A地点: 509.6g dry wt./ $\text{m}^2$  (12.22kg fresh wt./ $\text{m}^2$ )、B地点: 598.89g dry wt./ $\text{m}^2$  (13.56kg fresh wt./ $\text{m}^2$ )で、相対生長率も収穫管理下で、この時期が最も高かった。これは、前述したように10月から11月上旬にかけて非常に温暖な天候が続いた為と考察される。従って、岡山県下では比較的温暖な気象条件が得られれば12月までは現存量生長量の増加が十分に認められると考えられる。しかし、本調査の値は、諸地域で報告されている季節別最大生産量が約1.5kg dry wt./ $\text{m}^2$ 前後であるので、<sup>112)</sup>比較すると劣っている。これは、調査開始期が遅れた為に最大生産量を得た時期が生育盛期を過ぎていたことによる。

次にFig. 59の乾物生産量を茎葉部と根部とに部位別にわけてFig. 60に示した。同時にT-R率も記載した。T-R率はA地点で平均3.51、B地点で5.99、C

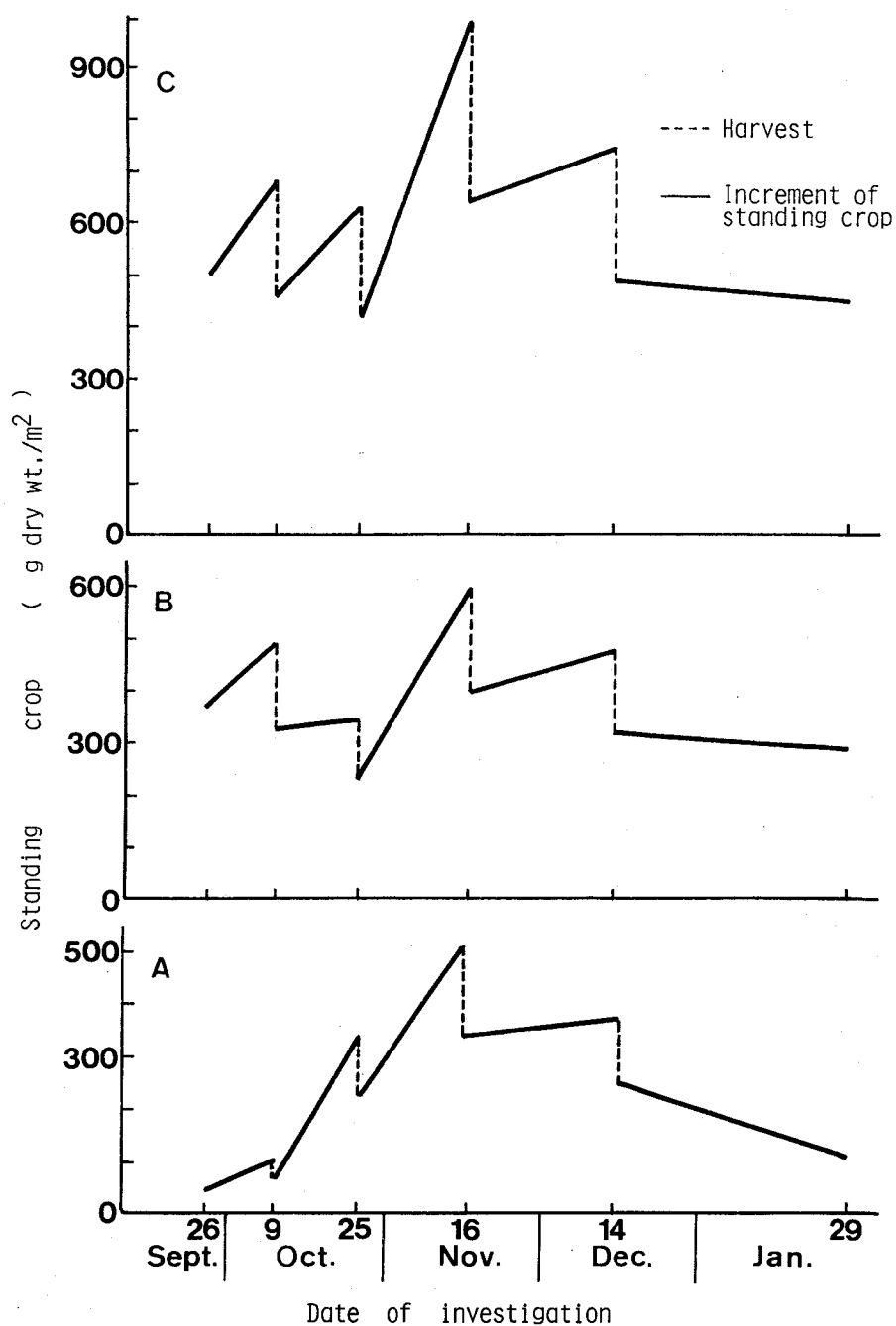


Figure 59. Change in the standing crop as dry weight.

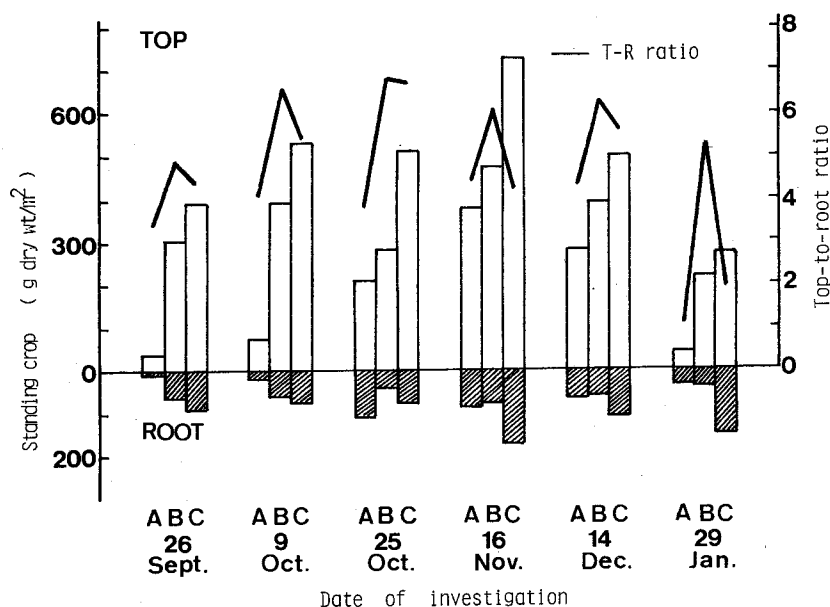


Figure 60. The standing crop as dry weight and the top-root ratio for waterhyacinth populations grown in three locations.

地点で4.71の値で、1%水準で有意にB地点が高かった。これらの値は、Boydら<sup>18)</sup>が水耕栽培により求めた値よりかなり高く、根量が少なかったことを意味しているが、一般に富栄養化した水系ではT-R率は高くなり、特に水中のリン濃度との関係を、Knipling<sup>57)</sup>も指摘している。

#### (4) 植物体内の窒素及びリン含有量と蓄積量

まず、植物体内の部位別窒素含有率をTable 27に示した。植物体内の無機含量は生息地、季節、水質の違いにより同種でもかなり変異の幅が生じると報告されているが、<sup>61, 100)</sup> 本調査では窒素の場合、茎葉部のみABCの地点間及び季節間の有意差が認められなかった。しかし、根部においては地点間で0.1%水準で有意、季節による変動は5%水準で有意であった。冬期におけるB地点の含有率が高いことが顕著であったが、この地点の水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が秋期から冬期に高い傾向にあったこととの相関関係は明らかにできなかった。また、茎葉部と根部との間には、C地点のみ1%水準で有意差があった。全般に、本調査で得られた分析値は前節と同様に高い値と考えられる。

Table 27. Content of nitrogen ( % dry weight ) in waterhyacinth grown in three locations.

| Part | Location | Date        |           |            |            |            |            | Average     |
|------|----------|-------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|
|      |          | Sept.<br>26 | Oct.<br>9 | Oct.<br>25 | Nov.<br>16 | Dec.<br>14 | Jan.<br>29 |             |
| Top  | A        | 4.00 a      | 4.84 a    | 4.91 a     | 4.05 a     | 3.95 a     | 2.22 a     | 4.00±0.97 a |
|      | B        | 3.89 b      | 3.64 b    | 3.62 b     | 3.76 ab    | 3.67 a     | 4.22 b     | 3.80±0.23 a |
|      | C        | 3.56 c      | 3.76 b    | 3.74 b     | 3.59 b     | 3.31 a     | 2.88 b     | 3.47±0.33 a |
|      | Average  | 3.82±0.23   | 4.08±0.66 | 4.09±0.71  | 3.80±0.23  | 3.64±0.32  | 3.11±1.02  |             |
| Root | A        | 2.63 a      | 2.44 a    | 2.50 a     | 2.12 a     | 2.25 a     | 3.49 a     | 2.57±0.49 a |
|      | B        | 3.74 b      | 3.79 b    | 3.11 a     | 2.68 a     | 3.12 a     | 4.38 b     | 3.47±0.61 b |
|      | C        | 2.00 c      | 1.83 a    | 1.66 b     | 1.83 a     | 2.47 a     | 2.20 c     | 2.00±0.30 c |
|      | Average  | 2.79±0.88   | 2.69±1.00 | 2.42±0.73  | 2.21±0.43  | 2.61±0.45  | 2.00±0.30  |             |

Values having the same letter in each column are not significantly different at the 5% level by Duncan's Multiple Range Test.

一方、リンについてはTable 28 に示す通り、窒素の場合と異なり、茎葉部は5%水準で地点間及び季節による有意差があり、根部も同様に0.1%水準の高い有意差を認めた。しかし、茎葉部と根部との間に有意差があったのは窒素の場合と同じくC地点のみであった。富栄養化の進んだB地点で高い含有率が認められ、特に根部において、しかも冬期に著しかったことが明らかになった。一般に植物は、窒素をリンの5倍から10倍の割合で吸収しており、<sup>19)</sup> 特にホテイアオイは、他の植物よりリンの吸収が高いと報告されているが、<sup>9)</sup> 本調査でも、その傾向が認められ、窒素はリンの約5倍の含有率であった。しかし、B地点におけるリンの冬期の根部の含有率が約1%という値は注目すべき高い値である。また、リンの部位別含有率は窒素に比べて比較的多く研究されており、水中のリン濃度により植物組織内のリンの分布状況が異なると報告されている。<sup>39)</sup> すなわち、水中のリン濃度が5~10ppm付近では、ほとんど茎葉部に集中的に集積されるのに対し、20ppm以上では茎葉部、根部共に均一に分布するといわれ、Wolvertonら<sup>158)</sup>も、同様の結果を得ている。しかし、本調査ではA及びC地点では茎葉部に主に集積されたが、B地点では水中リン濃度が20ppm以下にかかわらず茎葉部と根部にほぼ均一に分布していた。

次に、各調査時の各部位の乾物生産量に、各部位の窒素及びリン含有率を乗



Table 28. Content of phosphorus ( % dry weight ) in waterhyacinth grown in three locations.

| Top      |                      |   |                      |    |                      |   |                      |    |     |
|----------|----------------------|---|----------------------|----|----------------------|---|----------------------|----|-----|
| Date     | A                    |   | B                    |    | C                    |   | Average              |    |     |
| Sept. 26 | 0.363                | a | 0.680                | a  | 0.664                | a | 0.569 <u>±</u> 0.179 | a  | (%) |
| Oct. 9   | 0.727                | b | 0.850                | b  | 0.771                | b | 0.783 <u>±</u> 0.062 | bc |     |
| 25       | 0.768                | b | 0.916                | bc | 0.874                | c | 0.853 <u>±</u> 0.076 | bc |     |
| Nov. 16  | 0.964                | c | 0.988                | c  | 0.744                | b | 0.899 <u>±</u> 0.134 | c  |     |
| Dec. 14  | 0.822                | b | 0.919                | bc | 0.760                | b | 0.834 <u>±</u> 0.080 | bc |     |
| Jan. 29  | 0.576                | a | 0.859                | b  | 0.674                | a | 0.703 <u>±</u> 0.144 | ab |     |
| Average  | 0.703 <u>±</u> 0.209 |   | 0.869 <u>±</u> 0.105 |    | 0.748 <u>±</u> 0.076 |   |                      |    |     |
| Root     |                      |   |                      |    |                      |   |                      |    |     |
| Date     | A                    |   | B                    |    | C                    |   | Average              |    |     |
| Sept. 26 | 0.216                | a | 0.559                | a  | 0.308                | a | 0.361 <u>±</u> 0.178 | a  | (%) |
| Oct. 9   | 0.330                | b | 0.849                | c  | 0.418                | b | 0.532 <u>±</u> 0.278 | ab |     |
| 25       | 0.368                | b | 0.746                | b  | 0.446                | b | 0.520 <u>±</u> 0.200 | ab |     |
| Nov. 16  | 0.440                | c | 0.928                | cd | 0.452                | b | 0.607 <u>±</u> 0.278 | b  |     |
| Dec. 14  | 0.613                | d | 0.975                | d  | 0.463                | b | 0.684 <u>±</u> 0.026 | b  |     |
| Jan. 29  | 1.076                | e | 1.085                | e  | 0.754                | c | 0.973 <u>±</u> 0.189 | c  |     |
| Average  | 0.507 <u>±</u> 0.308 |   | 0.857 <u>±</u> 0.186 |    | 0.474 <u>±</u> 0.149 |   |                      |    |     |

Values having the same letter in each column are not significantly different at the 5% level by Duncan's Multiple Range Test.

じることにより、ホテイアオイ個体群による両成分の蓄積量を試算した。その結果はFig. 61 に示した通りである。両成分共、11月16日に最高の蓄積量を得ており、A地点で窒素：17.14 g/m<sup>2</sup>、リン：4.03 g/m<sup>2</sup>、B地点で窒素：19.90 g/m<sup>2</sup>、リン：5.40 g/m<sup>2</sup>、C地点で窒素：29.23 g/m<sup>2</sup>、リン：6.18 g/m<sup>2</sup>であった。総じて、C地点での蓄積量が高かった。また、茎葉部が枯れ、枯死株が出現した

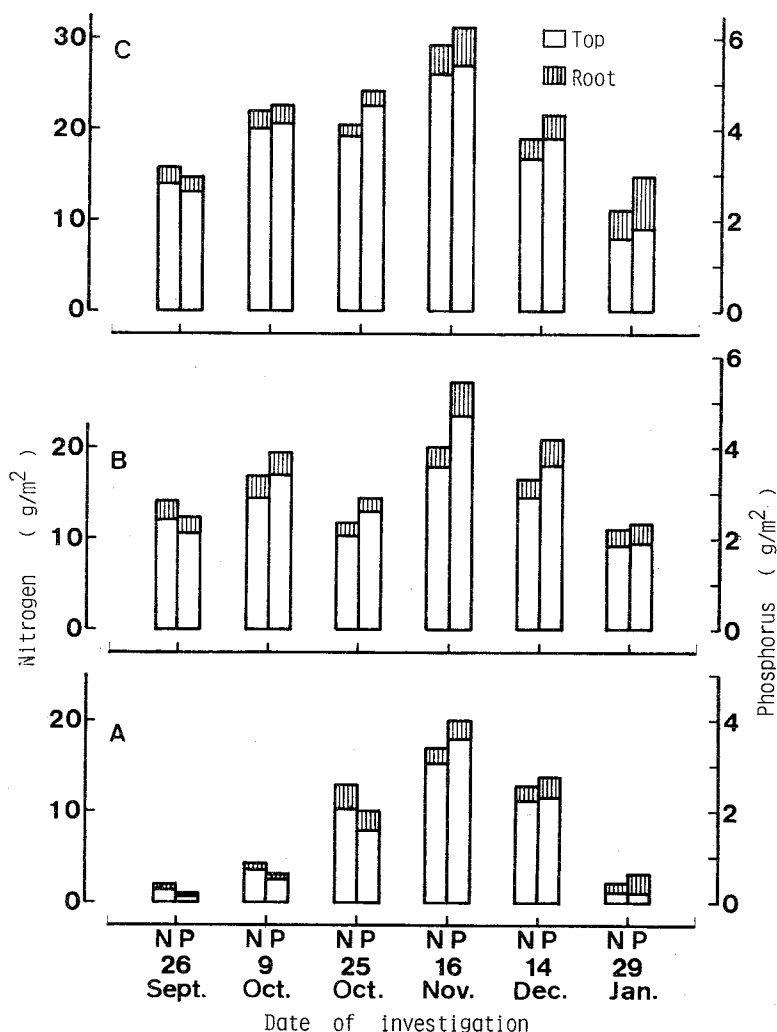


Figure 61. Accumulation of nitrogen and phosphorus by waterhyacinth populations. N,P represent nitrogen and phosphorus, respectively.

1月29日のA及びC地点では、根部における蓄積量の割合が両成分共、高くなっていることが認められた。ところで、B地点の植物体の両成分の含有率が高いにもかかわらず、C地点での個体群による蓄積量が高かったのは、現存量の差によると推察されたので、蓄積量を決定する要因として、現存量と植物体内の含有率とどちらがより大きく関与するか把握する為、双方の相関を求めたところ、Table 29の通りとなった。窒素の場合、現存量との相関が非常に高かったが、B地点の根部のみ低かった。

一方、リンにおいては窒素とやや異なり、現存量との相関は茎葉部と株全体

Table 29. Correlation coefficients (r) between accumulation of nitrogen and phosphorus by waterhyacinth populations and standing crop, content in dried plants, respectively.

|   |             | Accumulation by populations (g/m <sup>2</sup> ) |          |          |            |          |          |
|---|-------------|---|----------|----------|------------|----------|----------|
|   |             | Nitrogen  |          |          | Phosphorus |          |          |
|   |             | A   | B        | C        | A          | B        | C        |
| Standing crop<br>(Dry weight g/m <sup>2</sup> ) | Top         | 0.918**   | 0.993**  | 0.953**  | 0.953**    | 0.955**  | 0.948**  |
|   | Root        | 0.924**   | 0.682    | 0.889**  | 0.780      | 0.703    | 0.871*   |
|   | Whole plant | 0.896***  | 0.968*** | 0.962*** | 0.860***   | 0.969*** | 0.944*** |
| Content<br>in dried plants<br>(%)               | Top         | 0.611   | -0.542   | 0.838*   | 0.954**    | 0.697    | 0.707    |
|   | Root        | -0.110  | 0.194    | -0.015   | 0.595      | 0.614    | 0.859*   |
|   | Whole plant | 0.698   | 0.373    | 0.766*   | 0.898***   | 0.236    | 0.919*** |

\*, \*\*, \*\*\* significant difference at 5%, 1% and 0.1% level, respectively.

では高かったが、根部においてはどの地点も低かった。含有率との相関は、窒素より比較的高い傾向にあったが、B地点は全く相関が無かった。従って、B地点ではリンの含有率が他の地点より高かったにもかかわらず、現存量がC地点より劣った為、蓄積量としてはC地点より低い結果となったと考えられる。

本章で得られた結果を考察すると、温帯地域の我が国においても、自然水域の夏期においては他の諸地域に劣らない生産量が得られることが明らかになった。本調査は、冷夏の影響があったので、通常の夏より若干、値が小さいと考えられ、異常繁茂した場合の被害の大きさが認識された。また、個体群の生長解析を行うことにより、現存量増加の様相が群落構造の違いにより異なることが認められた。従って、もし、本草の利用を試みる場合は、どの方向へ維持管理をすれば効率良い栽培システムが確立されるか予測が可能となった。

ところで、窒素及びリンの吸収能に関しては量的な概念と共に吸収速度も重要な要因となる。特にリンに関しては、初期の吸収速度は早いが、一定期間を過ぎると、その後は急激に低下するとの報告もあり、<sup>19)</sup> 個体レベルでの基礎知見の集積が必要である。

また一方では、個体群の生長に関与する気象条件等の他の環境要因との関係も、今後、解明されなければならない。

### 第3節 摘 要

1.本研究は、自然水域におけるホテイアオイの生産量及び群落構造の動態を把握する目的で行った。

2.最大増殖が実現した場合の  $\overline{RGR}$  は  $0.080 \sim 0.329$  /dayの範囲で、その季節の変化は平均気温のそれと同じ傾向を示した。

3.被度 100 %に達するまでは、 $\overline{RGR}$  は高く、倍加日数も 7 日以内であったが、その後の収穫管理により平均  $0.05 \sim 0.06$  /dayの  $\overline{RGR}$  が維持された。一方、自然放置区では個体群の生長が進むに伴い自己間引き現象が認められた。

4.収穫管理区の草高の度数分布は個体群の生育初期と後期には背ぞろい現象が認められ、中期は中高の正規分布を持続した。自然放置区は、生育が進むと共に分布幅が広がり、尖度の低い分布型を示した。

5.自然放置区では現存量が  $20 \sim 25 \text{ kg fresh wt./m}^2$  に達するまでは指数関数的生長を行い、全生長過程はロジスチック曲線に適合した。また、伸長生長が現存量増加に促進的に作用した。本調査中の全収穫量は倉敷川で  $2.672 \text{ kg dry wt./m}^2$ 、児島湖で  $2.791 \text{ kg dry wt./m}^2$  であった。

6.窒素及びリン含有率は葉期別に有意差が生じた。収穫管理区における個体群の両成分の平均含有率は窒素が  $3.06 \sim 3.57 \%$ 、リンが  $0.505 \sim 0.696 \%$  で、倉敷川が高かった。

7.栄養塩類の負荷量が異なる 3 水系で生産量を比較したところ、比較的富栄養化の進んでいない水系で最大値を得た。

8.茎葉部における窒素含有率は水系間及び季節間に差はなかったが根部は有意差があり、富栄養化の進んだ水系の植物体が高かった。一方、リン含有率は茎葉部、根部共に水中のリン濃度の高い水系で極めて高い値を示した。

9.個体群による窒素及びリン蓄積量は、植物体内の含有率より現存量との相関が高かった。

## 第4章 種々の生息地における適応力

水生植物には、陸上生活を営んでいたものが二次的に水界に属するようになったと考えられる種が多い。<sup>131)</sup>このために、まったく水中生活に適した機構を有する沈水性の植物においてさえ、水分供給の減少に伴う陸生型の出現が認められている。<sup>122)</sup>浮遊性の水生雑草の代表種であるホテイアオイも、野外調査で、季節及び時間帯により水位が変化し、水底の堆積土が露出する場所に根を下ろして生育している植物体を数多く観察している。また、人力除草により水中から駆除され、陸地に放棄された本草が陸生植物と同じ状況化で生存している様子も報告されている。<sup>105)</sup>Rarija は、<sup>98)</sup>この点に注目して簡単な耐乾性実験を行っている。

一方、本草の異常繁殖によりもたらされる種々の実害は、その旺盛な栄養繁殖によるところが大きいが、種子繁殖についても無視できない。既に、ナイル川流域や<sup>1)</sup>スリランカ<sup>1)</sup>などでは種子繁殖による被害を報じている。ところが種子繁殖に好適な条件は水位が比較的低く、かつ実生は浮遊状態より抽水状態で生育が促進されるとの報告もある。<sup>45)</sup>

従って、本草が世界各地で害草として繁茂する一因として、種々の生息地で速やかに適応できる能力が備わっていると推察されたので、本章では種々の育成状態下での生育特性、内部形態の観察及び種子繁殖に関して検討を行った。

### 第1節 種々の育成状態における生育特性

種々の水位の下での本草の生育特性を把握することは、防除及び利用の観点から重要と察せられたので、まず本節では、夏期及び冬期に浮遊、抽水ならびに陸生状態で本草を育成させ生育状況を比較した。また、本草の乾燥に対する抵抗性は比較的高いと考えられるので併せて検討した。

#### 1. 夏期の生育特性

##### (1) 実験材料及び方法

底に数ヶ所、穴をあけた15ℓ容量のポリ容器に水田土壌を入れ、京大構内の

ビニールハウスに水槽を作り、常に一定の水位に保ち、その中に上記のポリ容器を置き、次の処理区を設定した。A区：土壤水分含量 13.25 ~ 15.30 % (対乾土重)、B区：土壤水分含量 25.64 ~ 30.31 % (対乾土重)、C区：土壤水分含量 35.28 ~ 37.20 % (対乾土重)、D区：抽水状態、E区：浮遊状態とし、A区からC区までは、ライゾーム（生長点を含む株の基部）の部分が地中に半ば埋まるように植えた。D区は土壤表面上水深 5 cm の水を張り、ライゾームの部分が水中にあり、根が土中に埋まる状態にした。ポリ容器に葉数 5 枚前後、新鮮重 40 g 前後の成株 1 個を植え、各処理区に 6 ポットを供試した。実験は 8 月 5 日より 1 ヶ月間実施し、全処理区にし尿 ( $\text{NH}_4 - \text{N} : 1 \text{ ppm}$ ) を定期的に施肥した。実験終了後、新鮮重、葉面積、子株形成数、乾物重、植物体含水量を測定した。

## (2) 実験結果及び考察

### i) 生育状況

供試個体は、全処理区共、葉柄に脹らみの無いものであったが、実験終了後、各処理区により差が生じた。すなわち、陸生状態の A 区、B 区、C 区では終了時まで葉柄に脹らみが生じず外側に張り出すように生育したのに反し、抽水状態の D 区、浮遊状態の E 区は実験開始後 1 週間を経ると、徐々に葉柄が脹らみ始めた。葉柄が脹らむのは、内生ジベレリン含量が増加することに因ると報告されているが、<sup>104)</sup> 外的環境が引き金となって葉柄の形態が変化したと考えられる。

繁殖力に関しては、Fig. 62 に子株形成数を示したが抽水状態の D 区が子株形成数、形成速度において全処理区中、最も優れていた。特に孫株の形成において顕著であった。

また Fig. 63 に実験終了時の新鮮重を示したが親株は D 区 > E 区 > C 区 > B 区 > A 区の順で生育が良好であった。子株は、予想外に E 区の生育が劣ったが、その他の区は、土壤水分含量が低下するに伴い、生育が抑制された。閉鎖系の場合、浮遊状態と抽水状態では後者の方が土壤中の栄養塩類が溶出し、また、直接に泥中から養分を吸収できる点で、有利な環境下になることもあり、本実験では抽水状態が生育・繁殖に好適な結果となった。一方、土壤水分含量が 15 ~ 20 % (砂壤土の条件下でも枯死せず、子株も形成されうることが明らかになった。

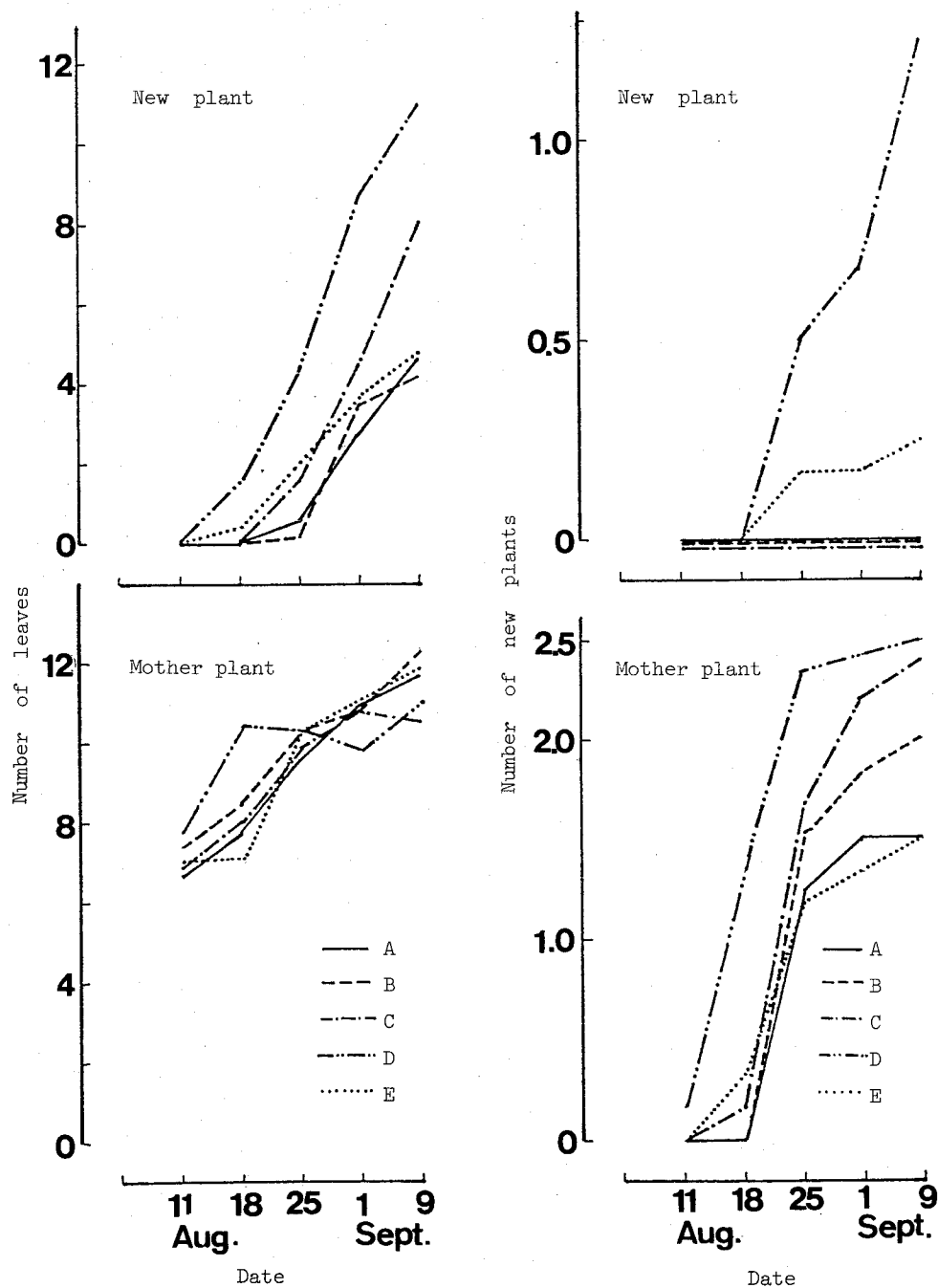


Figure 62. Growth of waterhyacinth plants grown under different conditions in summer.

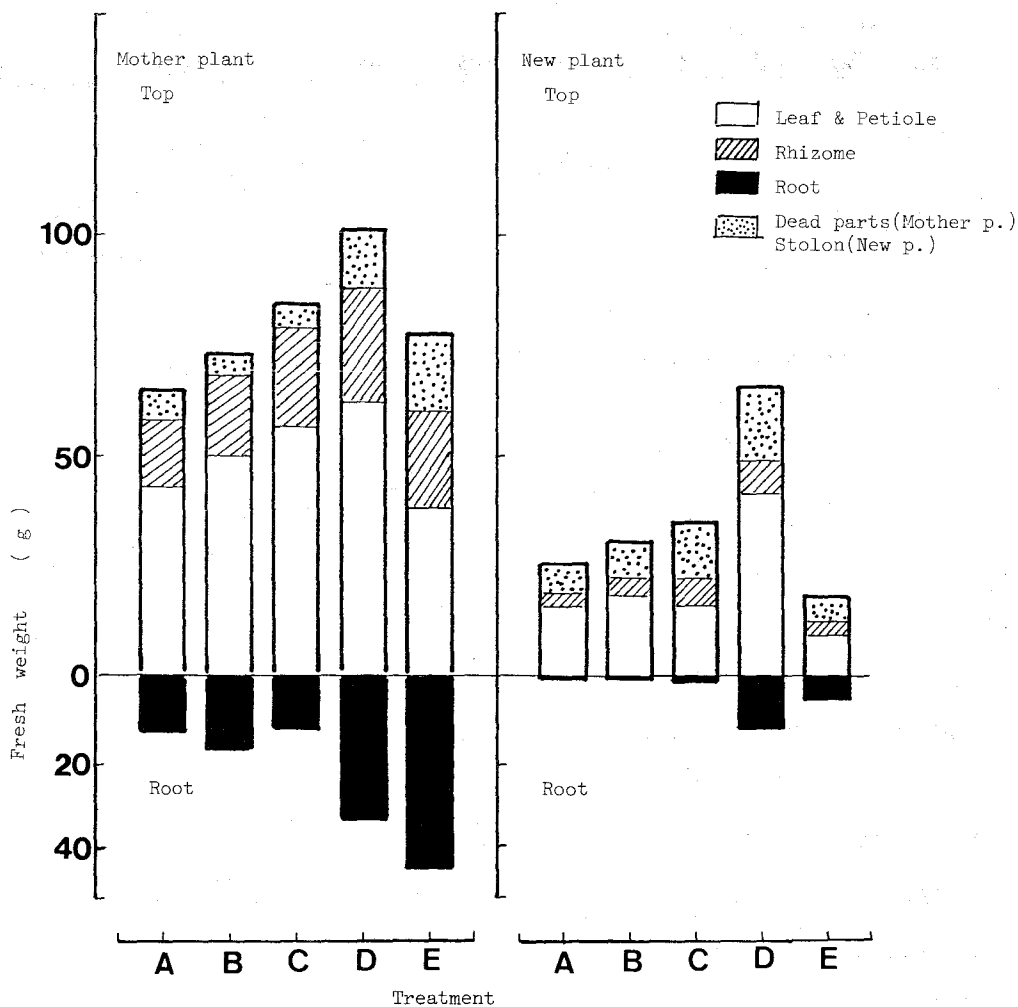


Figure 63. Fresh weight of waterhyacinth plants grown under different conditions in summer.

## ii) 葉面積

実験開始後、10日ほど経つと、葉数及び葉面積に関して、各処理区間で著しく差が生じてきた。Fig. 64 は、実験終了時の1枚当たりの平均葉面積と総葉面積を示したが、それによると1枚当たりの平均葉面積は親株、子株共にD区が最も大きかった。また、葉数もD区が最も多かった為、総葉面積もD区が大きく、土壤水分含量が減少するのに伴い総葉面積は有意に減少した。これは、植物体含水量が少なくなった陸生状態で、蒸散作用で損失する水分量を抑制する為に環境に対応する適応が行われた結果と考えられる。他の植物においても、



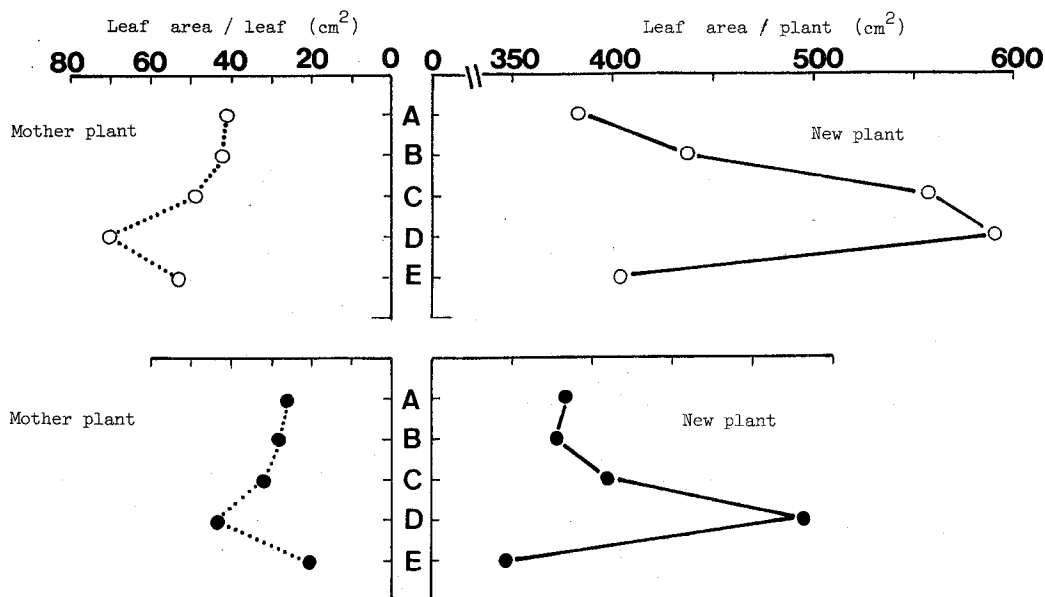


Figure 64. Leaf area of waterhyacinth plants grown under different conditions in summer.

一般に、この傾向は認められている。<sup>14)</sup>しかし、対照区のE区の生育が予想外に劣り、総葉面積の値が低かったので、さらに今後の検討を必要とする。

### iii) 植物体含水量

実験終了時における植物体含水量は、生育量と同様に土壤水分含量が減少するに伴い減少した。Table 30 に植物体全水分の含水率と、ライゾームにおける自由水と結合水を塩化コバルト浸漬法で<sup>13)</sup>測定したので、その結果を示した。陸生状態の全水分は、抽水及び浮遊状態と比較して減少した。Littleら<sup>65)</sup>が、ホテアオイと比較して飼料作物の全水分を測定しているが、77.9～91.5%の値

Table 30. Water content of waterhyacinth plants grown under different conditions in summer.

| Treatment | Water content ( % fresh weight ) |           |  |   |
|-----------|----------------------------------|-----------|--|---|
|           | Whole plant                      |           | Rhizome                                      |   |
|           | Mother plant                     | New plant | Mother plant<br>( Free water + Bound water ) | New plant<br>( Free water + Bound water ) |
| A         | 87.80                            | 90.75     | 86.41 ( 83.87 + 2.54 )                       | 88.25 ( 87.91 + 0.34 )                    |
| B         | 87.86                            | 88.03     | 86.09 ( 83.50 + 2.59 )                       | 88.15 ( 87.79 + 0.36 )                    |
| C         | 87.38                            | 87.26     | 87.70 ( 85.20 + 2.50 )                       | 88.73 ( 88.22 + 0.51 )                    |
| D         | 89.60                            | 90.80     | 88.87 ( 83.39 + 5.48 )                       | 88.68 ( 84.16 + 4.52 )                    |
| E         | 91.64                            | 91.47     | 88.70 ( 87.34 + 1.36 )                       | 90.24 ( 89.98 + 0.26 )                    |

を示しており、陸生状態の本草の全水分は、この範囲に含まれる。結合水に関しては、D区の抽水状態下で極めて多いことが注目された。耐凍性と結合水（不凍結水）との間には平行関係が認められている。<sup>120)</sup> が、耐乾性との間に、どのような関係があるのか、<sup>114)</sup> 今後、詳細な検討が必要と考えられる。

## 2. 冬期の生育特性

### (1) 実験材料及び方法

12月11日より2ヶ月間、(1)夏期の生育特性の実験と同様の装置を使用し、種々の育成条件下での生育差異と越冬状況を観察した。処理区はビニールハウス内に4区、戸外に2区を設けた。すなわち、A区：土壤水分含量12.84～15.00%（対乾土重）、B区：土壤水分含量28.74～30.80%（対乾土重）、D区：抽水状態、E区：浮遊状態をハウス内に設定し、一方、戸外には、A区とE区に対応するC区（陸生状態）とF区（浮遊状態）を設けた。実験終了後、新鮮重、乾物重、植物体含水量及び枯死率を調査した。

### (2) 実験結果及び考察

#### i) 生育状況

新鮮重の増加量を、処理開始時を100として比数で表わしたのがFig. 65で

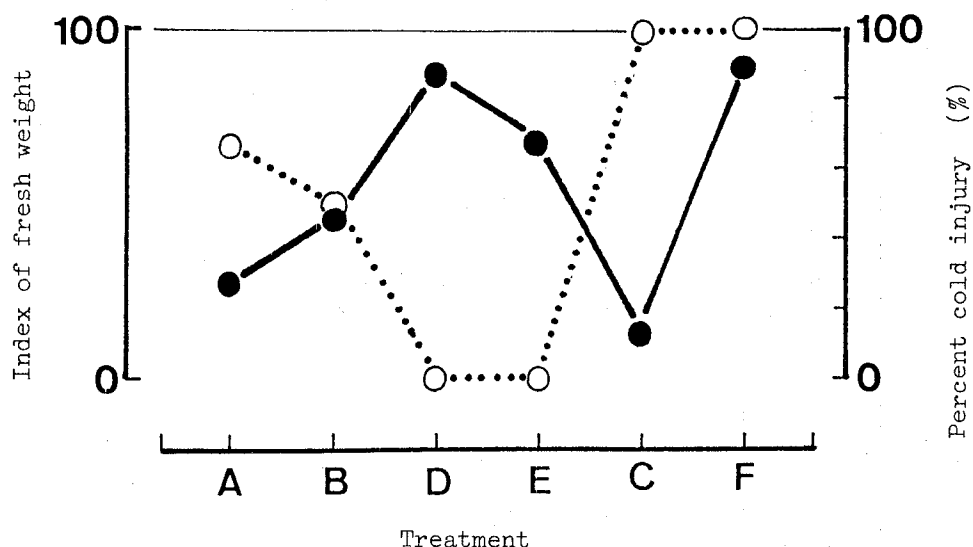


Figure 65. Growth (●—●) and percent cold injury (O·····O) of water-hyacinth plants grown under different conditions in winter. Index : Initial fresh weight = 100.

ある。すべての処理区で、開始時の新鮮重を保ち得ず、抽水状態（D区）、浮遊状態（E区）でさえ、減少した。両状態の株は、見かけ上は健全株であったが、生育期から生育停止期に変換していたと推察される。

## ii) 枯死率

Fig 65 に示す通り、枯死率はC区 = F区 > A区 > B区 > D区 = E区の順に低くなった。終了時には戸外区は生存株が認められず、かつ、戸外陸生区（C区）が戸外浮遊区（F区）より早く枯死した。陸生状態では地温の低下によって植物が十分に水を吸収できず、植物体が乾燥して、<sup>132</sup>）その為に枯死率が高くなったと考えられたので、各処理区の日最高・最低水温及び地温を測定してFig. 66 に示した。それによると、陸生状態 > 抽水及び浮遊状態、かつ土壤水分含量が

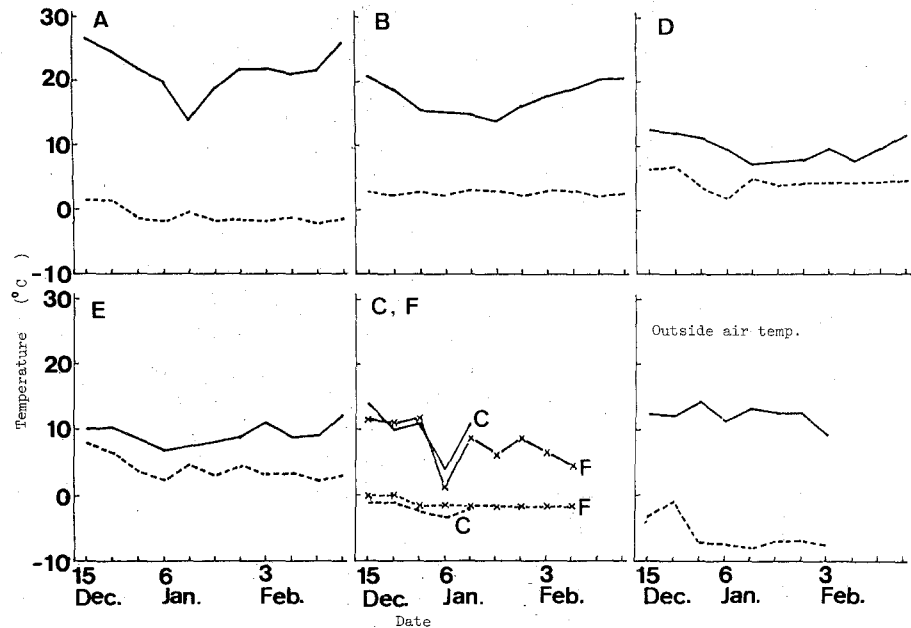


Figure 66. Change in weekly maximum (—) and minimum (----) temperature under different conditions in winter. A,B,C and D,E,F represent soil temperature and water temperature, respectively.

低くなるに伴い温度較差が大きくなっており、このことがライゾームの枯死率に影響を与えたと考えられる。戸外処理区においては、氷点下の継続が関与している。

また、実験終了時におけるライゾームの様相をTable 31 に示したが、生存株においても白色のままのライゾームは、抽水や浮遊状態以外は少なく、アント

Table 31. Percent survival of waterhyacinth plants and change in the color of rhizome after exposed to winter injury under different conditions.

| Treatment | Survival ( % )          | Killing ( % )                   |
|-----------|-------------------------|---------------------------------|
|           | ( White, Purplish red ) | ( Purplish red + Brown, Brown ) |
| A         | 33.3 ( 0.0, 33.3 )      | 66.7 ( 33.4, 33.3 )             |
| B         | 50.0 ( 16.7, 33.3 )     | 50.0 ( 33.3, 16.7 )             |
| D         | 100.0 ( 66.7, 33.3 )    | 0.0 ( 0.0, 0.0 )                |
| E         | 100.0 ( 66.7, 33.3 )    | 0.0 ( 0.0, 0.0 )                |
| C         | 0.0 ( 0.0, 0.0 )        | 100.0 ( 0.0, 100.0 )            |
| F         | 0.0 ( 0.0, 0.0 )        | 100.0 ( 0.0, 100.0 )            |

シアンが生成され、赤紫色に変色していた。

### iii) 植物体含水量

開始時と比較して、各処理区共に植物体全水分が減少していることがTable 32で認められる。この測定は処理開始3週間後に行ったものであるが、陸生状態では80～95%の葉柄が軟化し、抽水及び浮遊状態でも40～50%が軟化し、かなり低温障害が進んだ時期の値である。戸外区においては、1回目の寒波襲来により結氷及び解凍が行われた直後の値である。

一方、ライゾームにおいては、植物体全水分ほど減少しておらず、ライゾーム組織中の結合水の割合は、夏期の場合と同様に、D区の抽水状態で高かった。植物体内には凍結によって容易に奪取されやすい自由水と奪取されにくい結合水がある。植物組織の耐凍性と組織内の結合水の含有率との間には高い相関関

Table 32. Water content of waterhyacinth plants grown under different conditions in winter.

| Treatment | Water content ( % fresh weight ) |   |
|-----------|----------------------------------|---|
|           | Whole plant                      | Rhizome                                 |
|           | Mother plant                     | Mother plant (Free water + Bound water) |
| A         | 74.19                            | 82.63 ( 82.40 + 0.23 )                  |
| B         | 88.80                            | 88.80 ( 88.55 + 0.25 )                  |
| D         | 86.26                            | 86.71 ( 86.21 + 0.53 )                  |
| E         | 87.23                            | 86.76 ( 86.48 + 0.28 )                  |
| C         | 57.85                            | 78.11 ( 78.00 + 0.11 )                  |
| F         | 91.87                            | 91.35 ( 91.23 + 0.12 )                  |

係が認められている<sup>62)</sup>が本草の場合にも、比較的低温に対する抵抗性の高い抽水状態で結合水が多いという結果が認められた。

以上より、夏期において顕著に生育良好であった抽水状態が、冬期においても、低温に対する抵抗性を最も有していたことは、今後の本草の管理体系を組み立てる上で、重要な事項と考える。

### 3. 乾燥に対する抵抗性

#### (1) 実験材料及び方法

京大構内のコンクリート枠（ $180 \times 210 \text{ cm}^2$ ）3ヶを下記の条件に設定し、各処理区に新鮮重約60 g、葉数6枚の成株60個体を7月5日に植え付けた。すなわち、浮遊区（水深30 cm、水底に泥土）、抽水区（水深10 cm、水底に泥土）および陸生区（土壤水分含量 乾土重当り 11.26 ~ 16.59%、1日1回灌水）を設定した。生育盛期に各処理区から105個体を採取し、シリカゲルと共にポリ袋に入れ20℃恒温で自然乾燥をさせ、6日毎に漸次取り出し、含水量とライゾームの細胞液濃度を屈折計で測定、かつ一部を自然条件下に戻して生死判定を行った。

#### (2) 実験結果及び考察

各処理区の個体の乾燥に対する抵抗性をFig. 67に示した。まず、回復率を調べると、陸生区>浮遊区>抽水区の順で陸生区が最も優れていた。陸生区で抵抗性が高かった理由を検討すると、まずライゾームの細胞液濃度が、開始時から処理日数42日目に至るまで、有意に他の2区より高いことが認められた。細胞液濃度が高いということは、可溶性糖類が多くなることで、耐乾性の高い種類の植物は、この傾向が認められている。<sup>58, 62)</sup>また、浮遊区及び抽水区の細胞液濃度の経時的变化をみると、回復率と対応して、回復率が下がる時点まで徐々に濃度が高くなっている様子が認められた。

一方、植物体が含水量の低下に耐え得る能力を表わす方法として乾燥可能度の測定がある。<sup>132)</sup>この乾燥可能度を表示する方法も種々あるが、本実験においては、乾燥処理中に損失した水分を測定して、これを処理開始時の新鮮重に対する百分率で表わした。この値が低いほど乾燥に対する抵抗性が高いと考えられるが、陸生区は一定して著しく値が低かった。

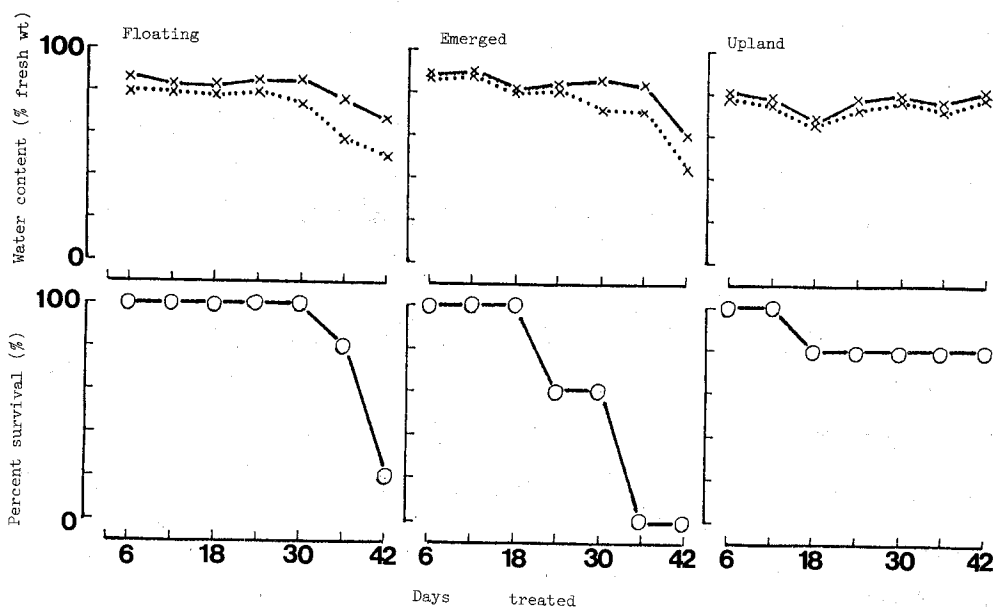


Figure 67-1. The relation between water content and percent survival of waterhyacinth kept dry some days in 20°C chamber. x-x: Rhizome, x...x: Whole plant.

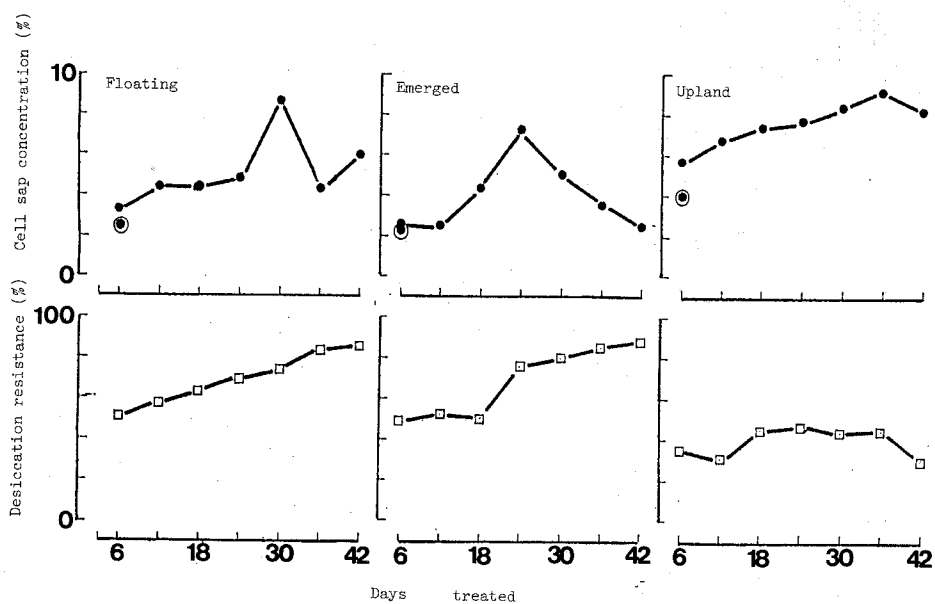


Figure 67-2. The relation between cell sap concentration and desiccation resistance of waterhyacinth kept dry some days in 20°C chamber.

●: Initial value.

Desiccation resistance:  $\frac{\text{Fresh wt. after treatment} - \text{Dry wt.}}{\text{Initial fresh wt.}} \times 100$

また、植物体全水分とライゾームにおける含水率を測定したところ、陸生区は一定して変動が小さかった。しかし、各区共一ヶ月間自然乾燥させても回復可能である事は興味深い。

## 第2節 種々の育成状態における組織学的研究

第4章第1節で、種々の育成状態での生育特性を明らかにしたが、<sup>86, 87)</sup> それらの結果から、抽水状態の生育が浮遊状態に劣らず良好であり、開花数も多く、かつ、土壤水分含量が13～15%（対乾土重）の陸生状態でも十分に生育可能であることを把握した。また、育成状態の水分が不足すると、葉面積が小さくなり、葉質が硬くなるなど外部形態にも差が認められた為、本草がどのような形態変化のもとに環境への適応や抵抗性を得るのか究明することが必要と考えられた。従って、種々の育成状態下に生じる各部位の内部形態の変化を観察することにした。一方、本草の蒸散能力は高いと報告されているが、<sup>63, 142, 155)</sup> 水分供給が制限された場合の気孔の数の変化も検討したので、併せて報告する。

### 1. 実験材料及び方法

浮遊区：水深30cmで水底は泥土、抽水区：水深10cmで水底は泥土、湿生区：土壤水分含量30～50%（対乾土重）に維持、乾生区：土壤水分含量10～14%（対乾土重）に維持、の4区を設定し、7月上旬に成株を植え付けた。その後、経時的に各処理区から適宜に材料を採取し、根、葉身及び葉柄の各部位をFAA（ホルマリン：氷酢酸：50%アルコール、5：5：90）で固定した。n-ブチルアルコールによりパラフィン誘導を行い、厚さ10 $\mu$ の切片を作製し、サフラニン・ファーストグリーン染色を行い検鏡した。

一方、気孔の観察は、上記の処理区中、浮遊区、抽水区及び乾生区から採取した成株の成葉の表裏両面を供試した。試料は2%グルタルアルデヒドで固定後、アセトン系列を通して脱水し、臨界点乾燥法で乾燥した。JSM-50FA（日本電子）走査型電子顕微鏡で観察し、気孔数は100視野における平均値を求めた。また、孔辺細胞の大きさ（長径）は、気孔の閉じた状態で測定し、100細胞の平均値を求めた。

## 2. 実験結果及び考察

### (1) 根の構造

まず、各処理区の様相をPlate 1に示した。Plate 1-1は、本草の浮遊型の状態で、クロロプラストを含まない表皮細胞の内側に皮層が存在している。一般に水生植物の根における通気組織の発達には皮層の部分に認められるが、<sup>1)</sup> 本草の場合、皮層は3層に明確に区分される。すなわち、通気組織まで発達しない柔細胞が、表皮細胞の内側の3~4層 (Plate 1-1、oc) と、中心柱付近の5~6層に観察され、後者の場合、細胞層が放射状に規則的に配置されているので、細胞間隙の発達も認められる (Plate 1-1、ic)。このような2つの柔組織の間に、通気組織が充分に発達し、細胞壁の薄い、繊細な細胞で空隙が放射状に仕切られている (Plate 1-1、a)。空隙部の出現には離生的あるいは破生的の2様式があるが、<sup>12)</sup> 本草の通気組織における空隙は細胞崩壊による破生間隙と考えられる。ただ、イネの根のように離生的に生じたものが、のち破生的に大きくなったのかどうかは不明である。

また、本草の中心柱は他の単子葉植物と同じく原生木部の数が多い多原型である。木部は原生木部間隙を中心に広がり、間隙の上側に仮導管を有する。一般に水生植物は木部の発達が遅れており、導管を有する種は少ないといわれている。<sup>12)</sup> 一方、師部は良く発達しており、<sup>42)</sup> 放射中心柱であるので、木部と木部の間に存在している。中心柱の中心は密な柔組織から構成されている。

次に浮遊型と比較して水分供給が少なくなった場合の地中根の構造をPlate 1-2に示した。Plate 1-1のoc. 及びic. に相当する皮層細胞の細胞壁の肥厚が顕著になっている様子が観察された。本来、この部位は厚膜組織であるが湿生型及び陸生型になるとさらに肥厚し、地上部を地中で支持する為に機械組織が発達したと考えられる。

また、浮遊型と陸生型との中間型である抽水型では2通りの根を有することになる。すなわち、浮遊型と同じ水中根と、泥中に伸長した地中根がある。後者の構造をPlate 1-3に示した。湿生型及び陸生型のように皮層細胞の厚膜化が認められた根と共に、このように皮層の最外層の柔組織が萎縮し、細胞が放射状に糸を張ったようになることにより空隙部が拡大した根が多く存在した。



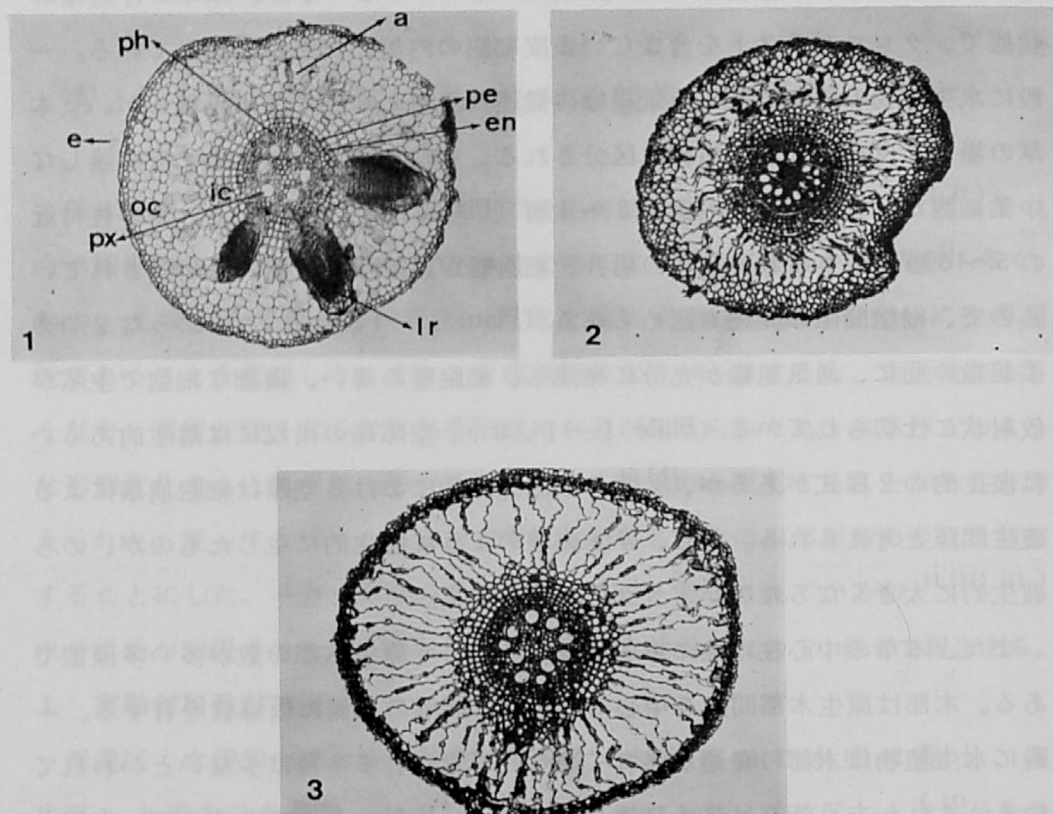


Plate 1. Photomicrographs of cross sections of root of E. crassipes grown under different conditions.

1: Floating type ( x32).

2: Wetland type ( x32).

3: Emerged type ( x32).

a. aerenchyma, e. epidermis, en. endodermis, ic. inner cortex, lr. lateral root, oc. outer cortex, pe. pericycle, ph. phloem, px. protoxylem lacuna.

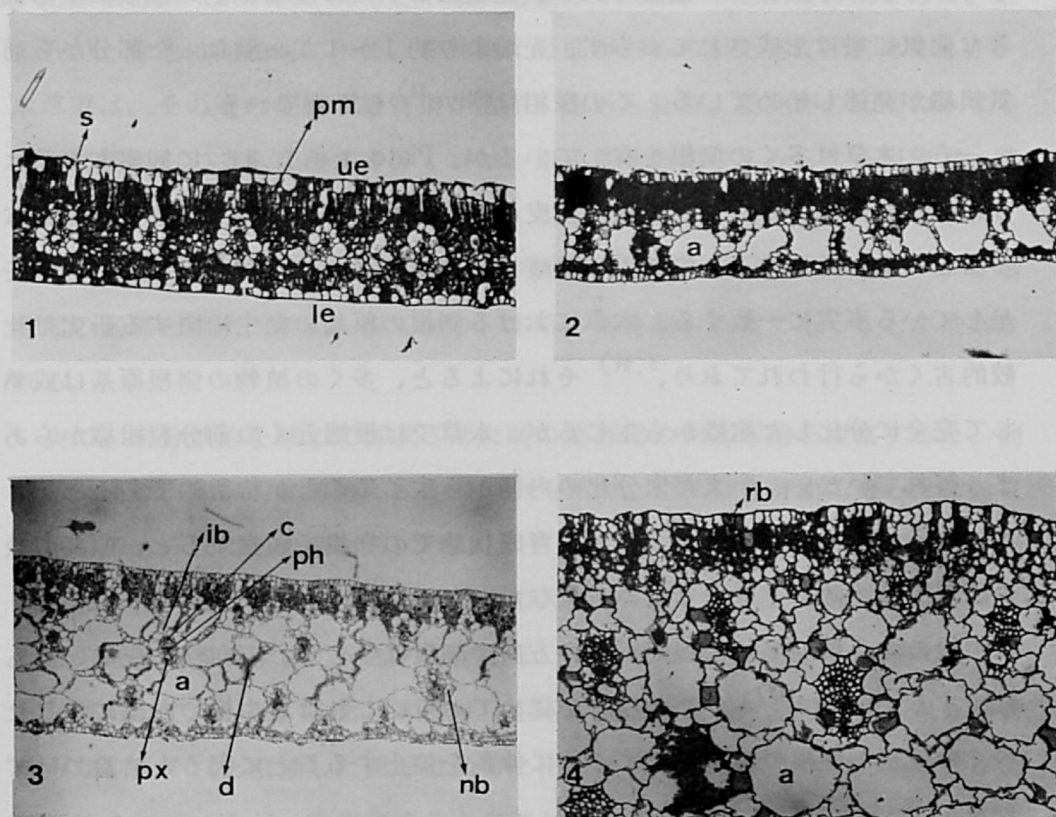


Plate 2. Photomicrographs of cross sections of lamina and petiole of E. crassipes grown under different conditions.

1: Tip of emerged type (x80).

2: Center of upland type (x80).

3: Base of wetland type (x80).

a. aerenchyma, c. collenchyma, d. diaphragms, ib. inverted bundle, le. lower epidermis, ms. cell containing a secretion, nb. normal bundle, ph. phloem, pm. palisade mesophyll, px. protoxylem lacuna, rb. raphide bundle, s. stoma, ue. upper epidermis.

この状態は、イネを含めた湿生植物によく観察されるもので、<sup>4)</sup> 通気組織系の高度な発達によるガス交換の容易さが推察される。ここに述べた根は、いずれも一本の根の中央部での観察であり、先端においては皮層細胞の崩潰による顕著な通気組織は形成されておらず、先端より約 1 ~ 1.5 cm 隔たった部分から通気組織が発達し始めている。この様相は Olive<sup>94)</sup> も認めている。

一方、本草は多くの側根を有しているが、Plate 1 - 1, 1r. に観察されるように側根の原基の外層は、主根の内皮に由来し、内層は内鞘が周囲形成層となることにより発達する。原基間の距離は非常に短く、側根の外観が羽毛状を呈している事実に一致する。本草における側根の原基の発生に関する研究は比較的古くから行われており、<sup>5, 94)</sup> それによると、多くの植物の側根原基は成熟して完全に分化した組織から生じるが、本草では根端近くの前分裂組織からあまり離れていない、いまだ未分化の内鞘から生じることが特徴的であると記されている。この側根に関して、他の育成状態での様相を観察すると、原基の数や原基間の距離に差は全く認められなかった。しかし、外観は地中根になると、水中根のように羽毛状に規則正しい方向で側根は生じず、方向性を失ない数も減少する。Ogura<sup>82)</sup> も、この現象を認めており、これは地中根の内部に生じた多くの原基が主根の表皮に達する前に伸長を停止することによって因ると結論づけている。

## (2) 葉身部及び葉柄部の構造

水生植物の最も顕著な組織学的な特徴は、非常に発達した空隙の存在といわれている<sup>3)</sup> が、必ずしもすべての種が、その傾向を示しているわけではない。本草の葉身部の場合、部位により空隙部が異なる。Plate 2 - 1 が先端部、Plate 2 - 2 が中央部、Plate 2 - 3 が葉柄に近い基部を示しているが、先端部では、上表面及び下表面に並ぶ柵状組織にはさまれた海綿状組織の部分に、大きな空隙部がみられない。それが、中央部になると海綿状組織の大部分が空隙となり、さらに基部になると柵状組織も少なくなり、空隙部と維管束系のみで構成された様相となる。この各部位の空隙の存在は、種々の育成状態で多少変化が認められることもあるが、まったく消失したり、逆に先端部に大きく生じたりすることは無く、Arber<sup>3)</sup> が述べている通り、遺伝子により固定された種の特徴

と考えられる。

本草の維管束は Plate 2 - 1 ~ Plate 2 - 3 に認められるように、形成層がない閉鎖維管束で、かつ、師部と木部が相接して成立する並立維管束である。ところが、普通は向軸側に木部、背軸側に師部があるのが正常な配置であるが、本草では、その逆の配置の維管束が数多く認められる。葉身部の基部のみならず先端部においても存在する。これは、単子葉植物に多くみられる現象で、葉身部が葉柄部の延長部として形成され、組織学的に差が無い偽葉の場合によく観察される。<sup>3)</sup> Plate 2 - 4 に葉柄部の内部構造を示したが、Plate 2 - 3 の葉身部の基部と構造的によく似ており、本草の葉身部も偽葉であることが推察される。

次に、水分供給を減じて育成させた時の葉身部の内部形態を観察すると、前述した通り、基本的な構造に変化は無かったが、やはり生育地に適した微妙な変化が認められた。すなわち、Plate 2 - 2 にみられるように、陸生化に伴い先端部の柵状組織が密に発達し、維管束の大型と小型の配列が不規則になった。本草の維管束はクロロプラストを含まない維管束鞘に包まれ、 $C_3$ 植物であることが明らかであった。また、木部は原生木部間隙を中心に良く発達した仮導管からなり、それと相接した師部は師管と伴細胞で構成され、その他は厚膜細胞で埋められているが、陸生化すると内部が、そのように分化していない小型の維管束が増し、特に基部における一定面積当たりの維管束数が増加した。さらに、陸生型の気孔は、陥入するものが認められた。蒸散抑制への適応が行われたものと推察される。

葉柄部も葉身部と同様に、陸生化に伴う機械組織の発達がみられ、表皮内側の厚膜組織に小型の維管束が多く認められた。また、Plate 2 - 4 の細胞内に針状結晶の多数平行に並んだ束状の結晶体である束晶が存在する細胞が認められるが、これは葉柄部だけでなく、葉身部、根部及び生長点の部位にも数多く観察され、かつ、すべての育成状態で認められた。束晶と共にサフランンで赤く染色された充填細胞が柵状組織内に存在した。これは、ある種の分泌物を含んだ細胞と考えられるが、ミズアオイ科の他の種にも多く存在している。<sup>3)</sup>

### (3) 気孔の分布

まず、浮遊区の葉を使って、一枚の葉を Fig. 68 に示すように区画分けし、部位別に気孔数を測定した。その結果を Table 33 に示した。Table 33 によると、本草は表裏両面に気孔を有し、表側が裏側より有意に多かった。中西<sup>71)</sup>が種々の水生植物の気孔分布を調べているが、抽水植物は表裏側共、気孔が存在し、浮遊及び浮葉植物は表側のみ存在している。ホテイアオイは浮遊型であるが、葉は常に気中葉になるので抽水植物と同じ傾向を示すと考えられる。本草と同じミズアオイ科のコナギは表側より裏側に多い点異なる。<sup>71)</sup>

また、部位別の単位面積当たりの気孔数は 1% 水準で表側、裏側共に有意差が生じた。すなわち、両側共、先端部と中央部の密度が高く、基部付近になると急激に低くなる。この傾向は Sculthorpe<sup>122)</sup> も認めている。本草の気孔数は他の水生植物と比較すると、<sup>71)</sup> 最も密度の高い部位においても中間値を示している。ガガブタ、ヒメスイレンなどの浮葉植物は本草の 3~4 倍を有しているが、これらの植物は表側のみしか存在せず、孔辺細胞の大きさも小さい。気孔数が少ない種は、逆に孔辺細胞が大きい傾向があり、その点からも本草の孔辺細胞の長径は平均  $31.5\mu$  (表裏共) で中間値を示している。

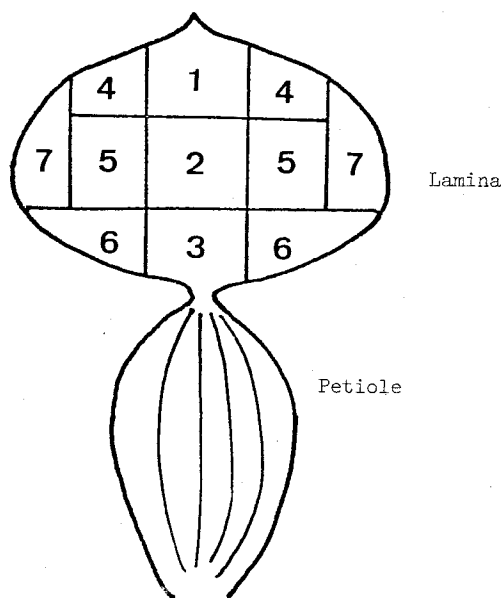


Figure 68. Diagram of the partition of lamina for the stomatal observation.

Table 33. Distribution of stomata on both surfaces at different parts of the leaf collected from floating type.

| Partition of lamina <sup>a)</sup> | Number of stomata / cm <sup>2</sup> |                  |            |       |
|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------|------------|-------|
|                                   | Upper side                          |                  | Lower side |       |
| 1                                 | 18217                               | ab <sup>b)</sup> | 13081      | abc   |
| 2                                 | 18995                               | a                | 13584      | ab    |
| 3                                 | 10285                               | e                | 5405       | e     |
| 4                                 | 14943                               | abcde            | 10885      | abcde |
| 5                                 | 16568                               | abc              | 11988      | abcd  |
| 6                                 | 10925                               | de               | 10712      | abcde |
| 7                                 | 15967                               | abcd             | 13993      | a     |

a) Number is in accord with Fig. 68.

b) Values having the same letter in each column are not significantly different at the 1% level by Duncan's Multiple Range Test.

一般に、水分供給が減少した場合、最も鋭敏に反応する作用は蒸散作用である。また、蒸散作用の調節に直接機能する器官は気孔であるという観点から、種々の育成状態下で気孔数に変化が生じるか否かを検討した。また、分布に部位間の差があることも考慮し、その傾向が把握しやすい Fig. 68 に示した 1, 2 及び 3 の部位について観察した。その結果は、Table 34 に示す通りである。育成状態の違いによる気孔数の違いは、表裏共に 1% 水準で有意であった。すなわち、抽水型及び陸生型になると明らかに気孔数が減少し、蒸散作用の調節が推察された。一方、浮遊型と同様に抽水型と陸生型も部位間の気孔密度の違いが明らかであった。

各育成状態下における表側と裏側の気孔分布の様相を電顕写真で示したのが Plate 3 である。先端部及び中央部の表側は不規則に一面に分布しているのに対

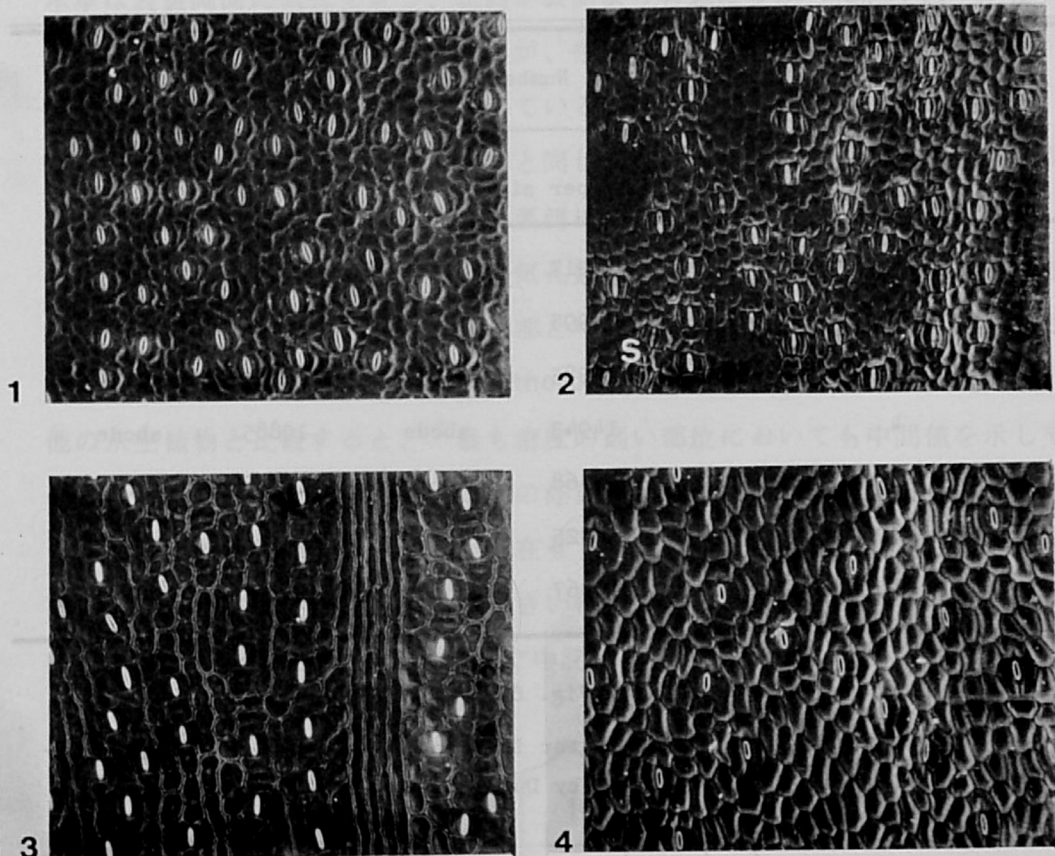


Plate 3. Distribution of stomata on both surfaces of leaf, photographed with scanning electron microscope.

- 1: Upper side, part No. 2, floating type ( x140).
- 2: Upper side, part No. 2, upland type. S shows the degenerative stoma ( x140).
- 3: Lower side, part No. 1, emerged type ( x140).
- 4: Lower side, part No. 3, upland type ( x140).



Table 34. The number of stomata per  $\text{cm}^2$  on both surfaces of leaves collected from floating, emerged and upland type.

| Growing condition | Partition of lamina <sup>a)</sup> |            |            |            |            |            |
|-------------------|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                   | 1                                 |            | 2          |            | 3          |            |
|                   | Upper side                        | Lower side | Upper side | Lower side | Upper side | Lower side |
| Floating          | 18217 a <sup>b)</sup>             | 13081 a    | 18995 a    | 13584 a    | 10285 a    | 5405 a     |
| Emerged           | 10029 b                           | 8721 b     | 8736 b     | 7387 b     | 4861 b     | 3200 a     |
| Upland            | 9836 b                            | 8736 b     | 9307 b     | 5969 b     | 4775 b     | 2469 a     |

a) Number is in accord with Fig. 68.

b) Values having the same letter in each column are not significantly different at the 1% level by Duncan's Multiple Range Test.

し、裏側は気孔が全く分布しない列が規則的に存在している。ただし、基部は裏側においても不規則な分布になっている。前述した通り、抽水型及び陸生型は浮遊型に比較して気孔数が減少したが、抽水型と陸生型の間には有意差が無かった。しかし、Plate 3-2、Sに観察されるように、陸生型の場合、気孔が陥入し痕跡器官を呈しているものが表側で数多く認められた。従って、陸生型の正常な働きをする気孔数は抽水型のそれより少ないと推定される。

水生植物は気孔の分布により、その種の進化の過程が類推できるものであるが、同じ科の植物でも気孔分布に差がある。気孔形成に関しては、環境により容易に変更されるものではなく、強く遺伝的に固定しているという説と、<sup>122)</sup>陸上植物で知られているように環境条件の違いにより変動するという説が<sup>71)</sup>ある。ヒルムシロ やスイレンなどは浮葉を陸生型に育成すると裏側に気孔が生じることが認められており、<sup>41)</sup> ホテイアオイと同じ傾向が報告されている。一般に水生植物は、種により前者になる場合と後者になる場合があるが、これは、その種が陸生から水生への適応馴化の移行段階のどの位置に存在するかにかかわってくると考えられる。

以上のことから、本草は浮遊状態より抽水状態へ、さらに陸生状態へと余儀なくされた場合、速やかに環境に適した内部形態をもちうることを確認され、ホテイアオイが雑草性を有する事実が明確にされたと共に、本草を利用する場



合、比較的広範囲な育成状態で栽培が可能であることが示唆された。

### 第3節 種々の育成状態における種子繁殖

本草は、冬期の気象条件により、越冬株数が決定される傾向があるが、近年、厳冬が続くことにより、越冬株が減少し、かわって、種子繁殖の問題が台頭し始めた。また、実生は水位低下後に多く認められている<sup>43,44)</sup>ことから、本節では種々の育成状態における本草の開花結実及び、採取された種子の発芽特性を検討した。

#### 1. 開花結実特性

##### (1) 実験材料及び方法

処理区設定は第4章第1節3の実験に準じる。新鮮重約60g、葉数6枚の花柄を有しない成株60株を7月5日に3処理区に植え付けた。各処理区の開花本数と着花数を毎日、調査すると共に、自然状態及び人工受粉させた場合の結実状況を1ヶ月後に調査した。

##### (2) 実験結果及び考察

###### i) 開花時期

Fig. 69 に示す通り、開花時期は、7月下旬から11月上旬であった。各処理区別に検討すると、浮遊区では、8月中旬に開花本数最高の時期が現われ、その後、9月中旬、10月上旬にピークを示した。月別本数は、8月が最も多かった。

一方、抽水区では、9月下旬に最高のピークを示したが、毎日ある一定の開花本数を保っており、その結果、月別本数は浮遊区と比較して8月を除いて多かった。

陸生区では、7月は他の2区と大差なく咲いていたが、8月以降は栄養生長を保つのみで、花芽分化にエネルギーを分配することができなかったと考えられる。

###### ii) 着花数

1花柄あたりの着花数を、月別にTable 35 に示した。それによると、各処理区間では1%水準で有意差があり (L. S. D. ; 3.36)、月別においても5%水準

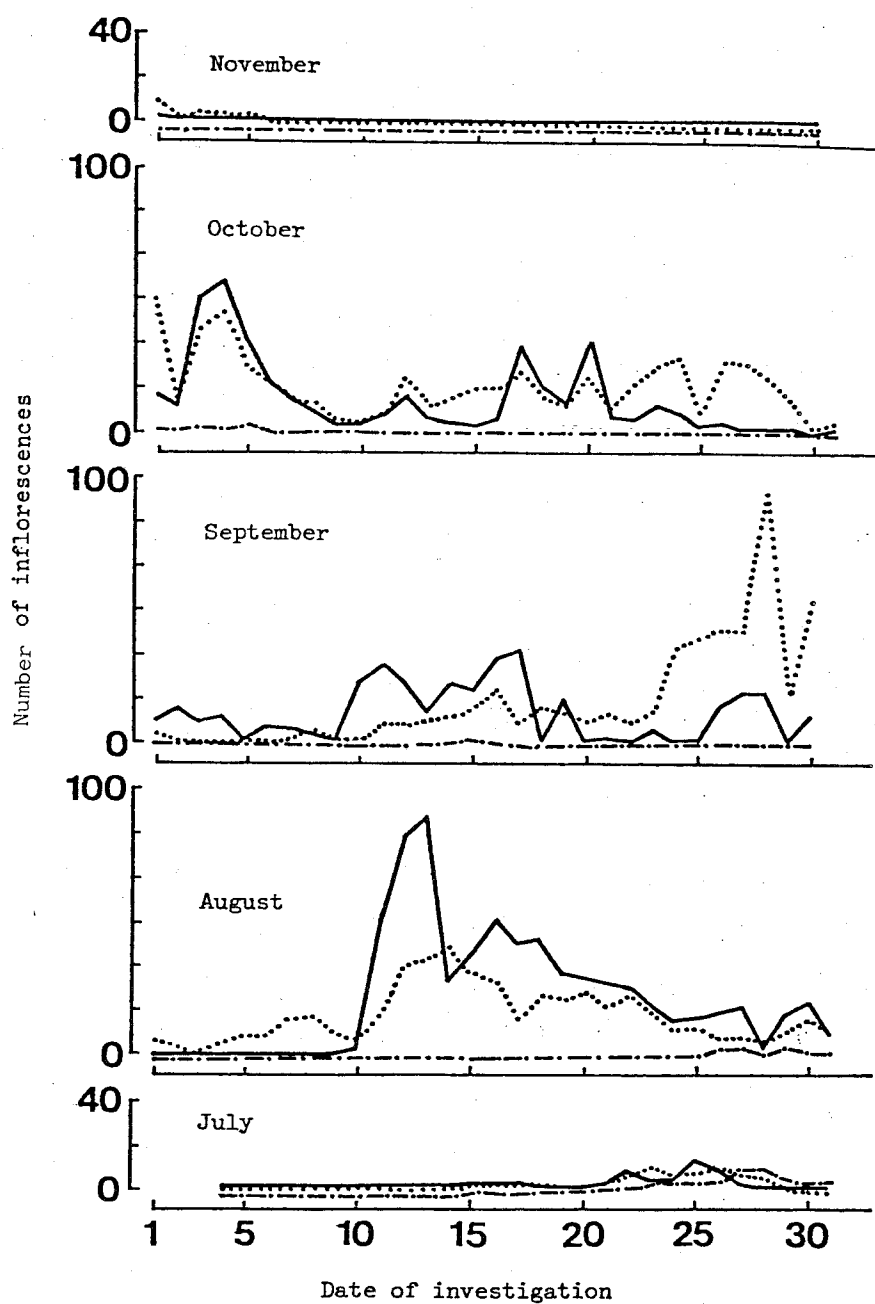


Figure 69. Period of flowering under different conditions.

— : Floating condition  
 ..... : Emerged condition  
 - - - : Upland condition

Table 35. The number of flowers per inflorescence under different conditions.

| Month     | Floating condition | Emerged condition | Upland condition |
|-----------|--------------------|-------------------|------------------|
| July      | 8.40 $\pm$ 1.593   | 9.64 $\pm$ 2.193  | 8.88 $\pm$ 1.030 |
| August    | 10.43 $\pm$ 1.160  | 10.24 $\pm$ 1.373 | 7.86 $\pm$ 0.748 |
| September | 12.53 $\pm$ 1.214  | 12.60 $\pm$ 2.410 | 6.00 $\pm$ 0.020 |
| October   | 9.70 $\pm$ 1.755   | 12.21 $\pm$ 1.361 | 7.10 $\pm$ 1.884 |
| November  | 5.00 $\pm$ 0.000   | 7.99 $\pm$ 1.428  | 0.00             |

で有意差があった (L. S. D. ; 2.53)。抽水区が総じて着花数が多かったのは、栄養生長が、この区で最も優れていた結果と考えられる。着花数は、地域や栄養条件など多くの環境要因の影響で変動するが、他の地域では、インドで10～15花、<sup>1)</sup>マレーシアで3～35花、<sup>6)</sup>カリフォルニアで8～18花、<sup>6)</sup>ルイジアナで4～7花、ナイル川で平均  $11.6 \pm 3.2$  花<sup>123)</sup>と報告されている。

### iii) 花の形質調査

開花期間中に、無作為に100花抽出し、雌ずいと雄ずいの空間的配置の様子を観察したところ、各処理区間に形質上の差がなかったので、浮遊区の結果を Fig. 70 及び Table 36 に示した。それによると短雄ずい3本と長雄ずい3本とからなり、雌ずいは、その中間に位置する。Table 36の値は、Seed ら<sup>123)</sup>の報告とほぼ一致する。ところが、本草は異花柱花 (Heterostyly) であることが知

Table 36. The mean lengths of the stamens and style of waterhyacinth.

| Style or Stamen | Mean length (cm) | Standard deviation ( $\pm$ ) |
|-----------------|------------------|------------------------------|
| A. Style        | 2.862            | 0.184                        |
| B. Short stamen | 1. 0.456         | 0.059                        |
|                 | 2. 0.633         | 0.072                        |
|                 | 3. 0.447         | 0.057                        |
| C. Long stamen  | 1. 1.779         | 0.107                        |
|                 | 2. 1.892         | 0.094                        |
|                 | 3. 1.718         | 0.082                        |

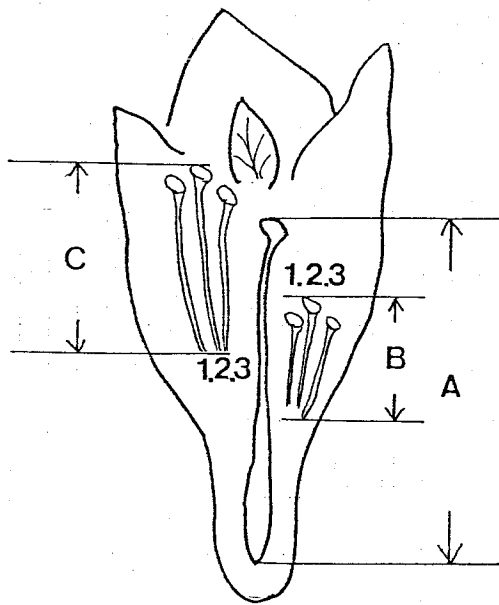


Figure 70. Spatial arrangement of stamens and style in water hyacinth. A: style, B: short stamen, C: long stamen.

られており、<sup>1, 102, 123)</sup>この他に雌ずいより長い長花柱花が存在する。ブラジル、U. S. A.、インド、スーダンなど多くの地域で中間型が一般にみられる型であると論じているが、<sup>1, 20, 102, 123)</sup>スリランカでは長花柱花が多いと報告されている。<sup>38)</sup>本実験では長花柱花は、まったく認められなかったが、少数ではあるが日本でも長花柱花を確認している。

#### iv) 結実状況

Table 37 によると自然状態で稔実朔果率は16～25%、人工受粉を行うと67～75%であった。自然状態での稔実朔果率は、インドで35%、<sup>1)</sup>スリランカで29%<sup>38)</sup>と、本実験と近似した値が報告されているが、マレーシア・ジャワ・ベンガル、スーダンでは結実しないか、あるいは僅か1%の稔実しか認められていない。<sup>123)</sup>本実験においては自然状態及び人工受粉の場合も、各処理区間及び月別の有意差を生じなかった。これは、本草が虫媒花であり、受粉の機会が偶然性に多分に依存しており、また、受粉さえすれば結実に関して育成状態及び時期的に影響されなかったことに依ると推察される。本草が虫媒花であるか否かは古くから論議されているが、<sup>102)</sup>最近、Barrettが<sup>9)</sup>ミツバチの役割の重要性を報告して

Table 37. Fruit-setting under different conditions.<sup>a</sup>

|   |            | condition   |          |                    |        |
|---|------------|-------------|----------|--------------------|--------|
|   |            | Pollination | Floating | Emerg <sup>b</sup> | Upland |
| Ratio of ripening capsules <sup>c</sup> (%) | Natural    |             | 25.37    | 21.05              | 22.36  |
|   | Artificial |             | 69.64    | 74.76              | 75.18  |
| The number of seeds per capsule             | Natural    |             | 47.06    | 46.64              | 62.11  |
|   | Artificial |             | 85.77    | 102.07             | 81.05  |
| The number of seeds per inflorescence       | Natural    |             | 146.12   | 130.67             | 141.89 |
|   | Artificial |             | 651.14   | 867.49             | 779.29 |

a: Average values for 4 months ( from July to October ).

b: Fruit-setting without the flowers being submerged under emerged condition.

c:  $\frac{\text{Ripening capsules per inflorescence}}{\text{Flowers per inflorescence}} \times 100$

おり、本実験中もミツバチを数多く観察した。

また、本実験の人工受粉はすべて自家受粉であるが、世界各地から集めた9クローンの自家不和合性を調べる為に自家受粉と他家受粉の結実の違いを論じた報告があり、<sup>8)</sup>それによると、クローンにより有意に結実状況に差のあるものが認められ、弱い自家不和合性が発現するクローンもあると結論づけている。本実験の稔実朔果率は少し低い傾向があり、上述の観点から、弱い自家不和合性が存在している可能性も考えられるので、さらに詳細な追求が必要である。

一方、1朔果中の種子数は、自然状態で34~62、人工受粉で81~102あり、後者の場合は抽水区で多かった。これは抽水区で栄養生長が盛んであったことに依ると推察される。

また、一般に本草は受粉後、花柄は水中に没するが、抽水区で密度が高くなった結果、花柄が水中に没することができず、大気中で維持された花柄が生じたので調査すると、陸生区と同じく、大気中でも水中の場合と同様に結実することが認められた。Talatalaら<sup>13)</sup>もこの事実を認めている。

## 2. 花粉発芽特性

### (1) 実験材料及び方法

#### i) 花粉の稔性

浮遊区で花柄を有した個体を 5℃、10℃、20℃、30℃の各温度条件下、全日長で育成し、開花日に花粉を取り出し、花粉置床法を用い花粉発芽率を調べた。発芽床は、2%寒天 + 0.01%ホウ酸 + 10%ショ糖を使用した。

#### ii) 受粉後の結実に及ぼす温度の影響

浮遊区の個体を使用し、28℃で人工受粉後、直ちに 5℃、10℃、15℃、20℃、30℃の各温度条件下（全日長）に移して育成し、50日後に稔実朔果率及び種子数を測定した。

### (2) 実験結果及び考察

#### i) 花粉の稔性

本実験の温度範囲ではTable 38に示す通り、30℃が花粉発芽最適温度と考えられる。温度が下がるのに伴い不稔花粉出現率が高くなった。なお、5℃区の花は蕾の状態を保ち完全に開花することはなく10℃区は完全に開花するまでに20℃及び30℃より1日多く必要とした。一般に本草は、1日花であるが10℃及び20℃区では2日間開花していた。

#### ii) 受粉後の結実に及ぼす温度の影響

本草の花粉発芽は30℃が好適であったが、受粉後、結実するにあたり温度の影響を無視することができない。従って、受粉後の各温度条件下における結実状況をTable 39に示した。それによると、稔実朔果率は30℃では100%であったが、20℃で72%、15℃で52%と稔実朔果は減少し、10℃及び5℃では結実不可能であることが明らかになった。

Table 38. Germination of pollen grains of waterhyacinth.

| Temperature<br>( °C ) | Germination      ( % ) |       |       |       | Sterile pollen<br>( % ) |
|-----------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------------------------|
|                       | Hours after setting    |       |       |       |                         |
|                       | 0.5                    | 1     | 2     | 5     |                         |
| 5                     | 6.07                   | 15.01 | 21.74 | 26.76 | 41.91                   |
| 10                    | 7.18                   | 20.12 | 25.56 | 30.31 | 28.89                   |
| 20                    | 19.54                  | 30.25 | 42.38 | 51.28 | 12.34                   |
| 30                    | 30.31                  | 52.52 | 61.22 | 77.65 | 3.67                    |

Table 39. Effect of temperature on capsule production and seed production.

| Temperature<br>( °C ) | Capsule set<br>( % ) | Seed set per flower<br>(Mean $\pm$ S.D.)                              |
|-----------------------|----------------------|---|
| 30                    | 100.00               | 686.0 $\pm$ 20.3 ( mature seed )                                      |
| 20                    | 72.16                | 205.5 $\pm$ 0.7 ( mature seed )<br>201.5 $\pm$ 11.5 ( immature seed ) |
| 15                    | 51.67                | 21.6 $\pm$ 2.9 ( mature seed )<br>116.4 $\pm$ 12.3 ( immature seed )  |
| 10                    | 0.00                 | 0.0   |
| 5                     | 0.00                 | 0.0   |

また、1花柄あたりの種子数は、20℃で30℃の種子数の60%、15℃で20%しか得られなかった。そして、20℃では完熟種子と未熟種子は同数、15℃では大部分が未熟種子であった。この場合、完熟種子とは、茶褐色で縦に翼条を呈する種子とし、未熟種子とは淡緑色を呈するものとした。Parija<sup>98)</sup>によると、稔実朔果は26.9℃～33.1℃で得られると報告されており、また、Barrett<sup>8)</sup>は本実験と同様の処理区を設定し20℃以下で稔実朔果が急激に減少したことを明らかにしている。完熟種子を得る為には少なくとも、20℃以上が必要であり、野外で10月頃の結実が、やや低下する傾向があったのは受粉後の温度の低下に起因したと推察される。

### 3. 種子の発芽特性

#### (1) 実験材料及び方法

##### 1) 温度が発芽に及ぼす影響

10℃、15℃、20℃、30℃の各温度条件区を設定し、本章第3節における浮遊区、抽水区、陸生区の3処理区から得た種子の発芽率を、カバーガラス被覆処理にて調べた。光条件は全日長とした。各処理区共、50粒3反復とし、供試種子は採取後4ヶ月間室内湿潤貯蔵したものである。なお、本草の種子は湿潤口紙上では、まったく発芽しなかったので、中島<sup>72)</sup>による水生植物種子の発芽実験法に準じて、シャーレに湿潤脱脂綿をおき、その綿上に種子を並べカバーガラスで覆う処理を行った。

## ii) 刺傷処理

i) と同様の種子を供試し、メスで傷を付け、寒天培地（種子は3%晒粉で1.5時間消毒）、カバーガラス被覆及びロ紙上の各発芽床で発芽率を調査した。各発芽床共、50粒3反復とした。

## iii) 酸、アルカリ及び各種薬品処理

i) と同様の浮遊区の種子のみを供試し、HCl (17.5%、35.0%)、 $H_2SO_4$  (19.6%、49.0%、98.0%)、NaOH (5.0%)、クロロホルム (99.0%)、エタノール (99.0%) 及びホルマリン (30.0%) の各溶液に一定時間、種子を浸漬し洗浄後、カバーガラス処理と湛水の2発芽床にて、50粒3反復で発芽率を調査した。

## iv) 0℃凍結が発芽に及ぼす影響

5℃、10℃及び室内で2ヶ月、湛水及び風乾状態で貯蔵した浮遊区、抽水区ならびに陸生区の種子(i)に供試した種子と同じ種子)を0℃で1日および7日間凍結させ、解凍後カバーガラス被覆処理で発芽率を調査した。50粒3反復で行った。

## v) 各種貯蔵条件が発芽に及ぼす影響

京大構内の浮遊、抽水、陸生区の各処理区から受粉30日後に採取(8月中旬)した種子を、暗黒条件下で、湛水及び乾燥条件で、かつ5℃、10℃、20℃、30℃及び野外で貯蔵した。採取当日及び、その後1ヶ月毎に種子を取り出し発芽実験に供試した。発芽実験はカバーガラス被覆処理で50粒3反復とし、30℃恒温光条件下で2ヶ月間行った。

なお、同様の3処理区から採取(11月上旬)した岡山産種子を野外で暗黒及び明条件下、かつ、湛水及び乾燥条件で6ヶ月間貯蔵し、1ヶ月毎に発芽実験に供試した。発芽実験は京都種子に準じる。

## (2) 実験結果及び考察

### i) 温度が発芽に及ぼす影響

Fig. 71 に示す通り、陸生区を除いて、発芽最適温度は25℃～30℃であった。25℃区が発芽開始日が最も早かったが、処理日数が進むに従って、発芽率は30℃とほぼ同じ値となった。育成状態による違いは生じず、花柄が水中に没せず



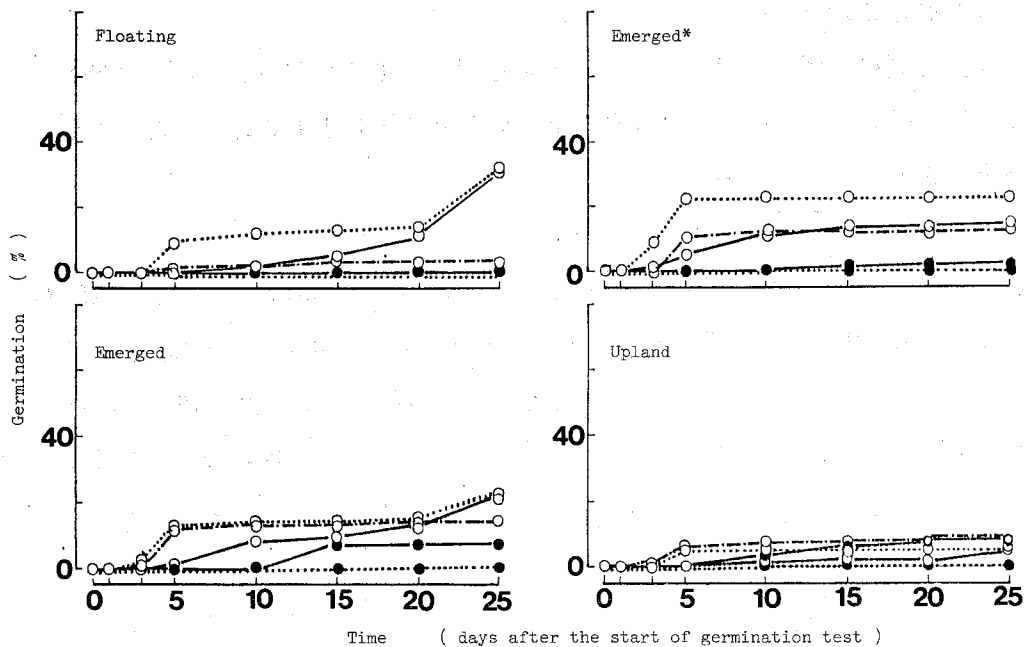


Figure 71. Effect of temperature on germination of seed under continuous light.

○—○: 30°C, ○—○: 25°C, ○—○: 20°C, ●—●: 15°C, ●—●: 10°C.

Emerged\* represents the seed set in non-submergence inflorescence under emerged condition.

とも、水中に没した場合と同様に発芽することが明らかになった。しかし、総じて発芽率が低かったので、本草の種子は休眠性を有する傾向があると推察した。

## ii) 刺傷処理

水生植物の種子は硬実が多く、強靱な種皮の為に発芽が抑制されることがある。<sup>73)</sup> 本草の種子に、その傾向があるのか検討する為に人為処理の一方法として、刺傷処理を行った。その結果をFig. 72に示したが、無処理区と比較して陸生区で得た種子の発芽率が非常に高かった。また、発芽床に関しては寒天培養地が3処理区共、良好であった。その他の発芽床で、浮遊区、抽水区共、発芽率が予想以上に低かったが、この結果は富久<sup>148)</sup>の報告と一致する。刺傷処理が発芽に及ぼす影響が低かったことは、今後検討を要する。なお、寒天培養のみ発芽率が高く表われたのは、刺傷処理以外の要因が関与したのではないかと推察される。

## iii) 酸・アルカリ及び各種薬品処理

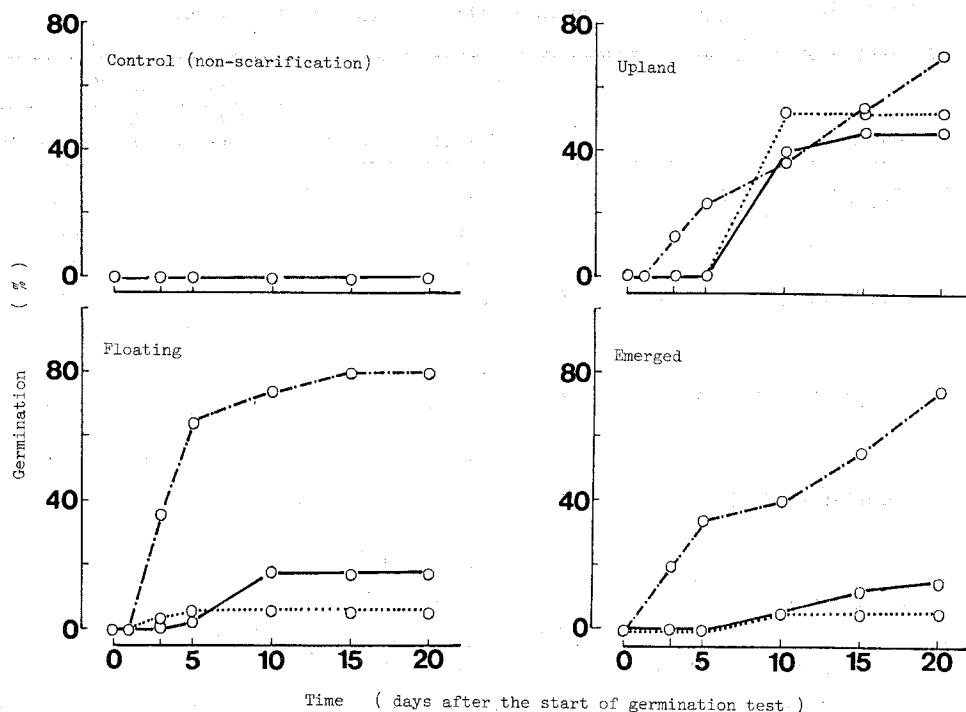


Figure 72. Effect of scarification in three types of germination bed on germination of seed under continuous light at 30°C. ---○--- : on the 2% agar culture medium, —○— : Covered with cover glass, .....○..... : on the wet filter paper.

種皮の軟化処理として有効な薬品を検討したところTable 40に示す通り、濃硫酸が最も効果があった。塩酸、水酸化ナトリウム、クロロホルム及びアルコール類は効果が無かった。エンドウの種子を種々の濃度の硫酸やホルマリン液に浸漬して発芽率を調べた報告があるが、<sup>73)</sup>それによると両薬品の有害作用という観点から論じており、両薬品の発芽に及ぼす有害作用は、濃度が増すに従って最初は増加するが、その後最高の濃度では被害の程度が急激に低下すると報じている。また、多くの種子は高濃度の酸の中に入れると偽発芽が起る<sup>73)</sup>ので、以上の点を考慮して、濃硫酸の効果を再度、検討する試みが必要である。

#### IV) 0℃凍結が発芽に及ぼす影響

凍結—融解後の発芽率の結果をFig. 73に示した。それによると、浮遊区、抽水区共に湛水条件のまま凍結させた場合に、発芽率が高かった。また、凍結日数は1日でも7日でも差は生じなかった。これより、凍結は単に種皮を軟化させ透過性を高める為の物理的な操作と推察されるが、室温18℃前後の

Table 40. Effect of chemical treatment on germination of seed.

| Treatment   | Time of treatment          | Germination (%)         |          |
|---|----------------------------|-------------------------|----------|
|   |                            | Coverd with cover glass | In water |
| Chloroform ( $\text{CHCl}_3$ )                    | 99% 12h                    | 0.0                     | 2.0      |
|   | 24h                        | 0.0                     | 0.0      |
|   | 48h                        | 0.0                     | 2.7      |
| Ethyl Alcohol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) | 99% 12h                    | 0.0                     | 2.0      |
|   | 24h                        | 0.0                     | 0.0      |
|   | 48h                        | 0.0                     | 2.0      |
| Methyl Alcohol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )         | 99% 12h                    | 0.0                     | 8.0      |
|   | 24h                        | 2.0                     | 7.0      |
|   | 48h                        | 1.3                     | 12.0     |
| Formalin ( $\text{HCHO}$ )                        | 30% 12h                    | 0.0                     | 2.0      |
|   | 24h                        | 10.7                    | 14.7     |
|   | 48h                        | 29.3                    | 52.7     |
| Hydrochloric Acid ( $\text{HCl}$ )                | 17.5% 10min, 30min, 60min  | 0.0                     | 0.0      |
|   | 35% 1min, 3min, 5min       | 0.0                     | 0.0      |
| Sodium Hydroxide ( $\text{NaOH}$ )                | 5% 30min, 60min, 120min    | 0.0                     | 0.0      |
| Sulfuric Acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )         | 19.6% 60min, 90min, 120min | 0.0                     | 0.0      |
|   | 49% 10min                  | 6.0                     | 10.0     |
|   | 60min                      | 29.0                    | 51.0     |
|   | 90min                      | 33.0                    | 58.0     |
|   | 98% 0.5min                 | 30.7                    | 71.7     |
|   | 1min                       | 68.0                    | 69.8     |
|   | 2min                       | 72.0                    | 63.5     |
| Control ( Distilled water )                       |                            | 0.0                     | 0.0      |

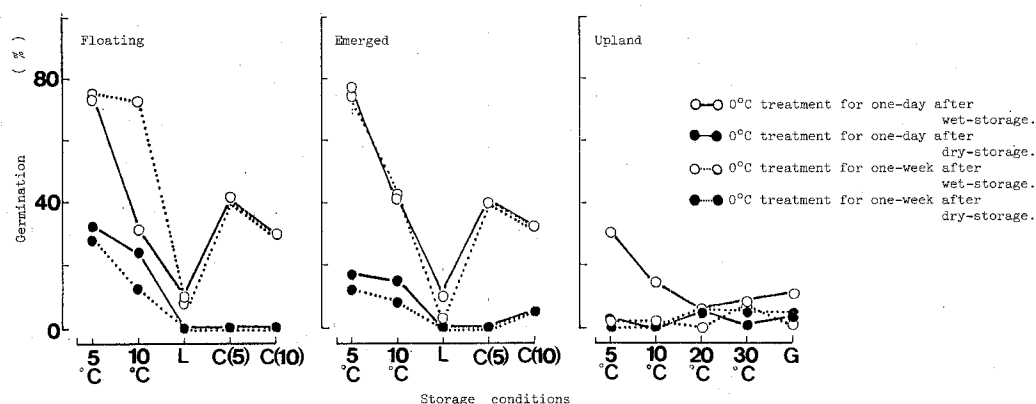


Figure 73. Effect of 0°C treatment after different storage conditions on germination of seed. C(5): non-0°C treatment after storage at 5°C, C(10): non-0°C treatment after storage at 10°C, L: in laboratory, G: in greenhouse.

室内、10℃貯蔵と貯蔵温度が上昇するに伴い凍結の効果が減じ、発芽率が低下しているので、低温に曝して種子内の質的变化を生じさせた後でなければ凍結効果は期待できないと考えられる。以上の結果は、我が国の季節性を考慮した種子繁殖の機構を解明する上で興味深い事実と考える。

#### V) 各種貯蔵条件が発芽に及ぼす影響

まず、各処理区から受粉後1ヶ月経た成熟種子（京都産）を採取し、発芽力を検定したが、いずれの区も発芽は認められなかった。その後、各貯蔵条件が発芽に及ぼす影響をFig. 74に示した。それによると、5℃及び10℃の低温貯蔵1ヶ月で発芽が認められ始めたが、発芽率は低かった。ところが、3ヶ月を経ると5℃及び10℃の低温湿潤貯蔵で発芽率が高まり、風乾貯蔵でも、少し湿潤と比較して劣るが、その傾向が認められた。

一方、20℃及び30℃では、4ヶ月を経て、やっと発芽が始まり、湿潤より風乾貯蔵で発芽が良好であった。貯蔵期間が6ヶ月以上になると、発芽実験開始後2日程度で一斉発芽が認められた。8、9及び10ヶ月後の発芽状況は、各貯蔵条件共良好で80～98%の発芽率を示した。ところが、11ヶ月後では、少し発芽率の劣る貯蔵区が表れ始め、1年後の状況はTable 41に示す通りであった。Table 41によると、低温湿潤条件下（5℃及び10℃）と高温風乾条件下（20℃及び30℃）では比較的高い発芽率を示したが、その他の条件下では低下した。中山<sup>73)</sup>は、水生植物の種子は低温湿潤下で寿命が保たれると述べており、ニュージーランドでは本草の種子の寿命は15年以上と報告されている。<sup>66)</sup> 本研究では確かに低温湿潤条件下で休眠覚醒も早く、かつ寿命が保たれたが、その他の条件下で1年後に発芽率が低下したのは致死によるものではなく二次休眠に入った為と推察される。一方、貯蔵初期に休眠覚醒が遅かった条件区で二次休眠に入るのが早かったことは、今後検討を要する。また、浮遊、抽水及び陸生区の3処理区間における差は貯蔵初期において陸生区が少し発芽率が高かったが有意差が生じるものではなかった。

次に野外貯蔵における発芽率の経時的变化を観察した。京都産種子の結果をFig. 75に示した。8月中旬に採取し、新鮮種子の発芽率を調べたが0%であった。その後、親株と同一場所で暗条件で貯蔵すると、12月中旬以降、発芽率が高く

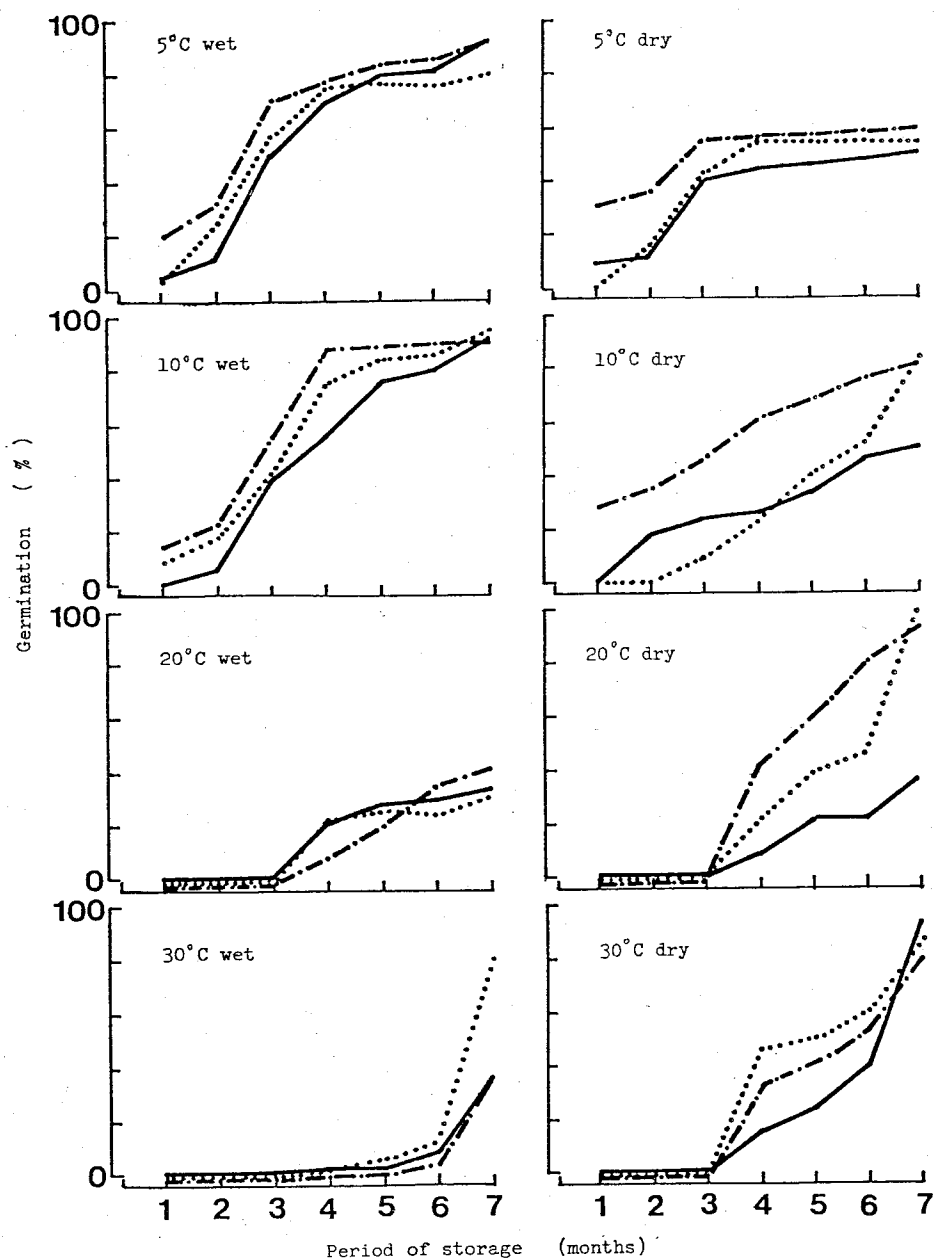


Figure 74. Effect of the conditions and the period of storage on seed germination.

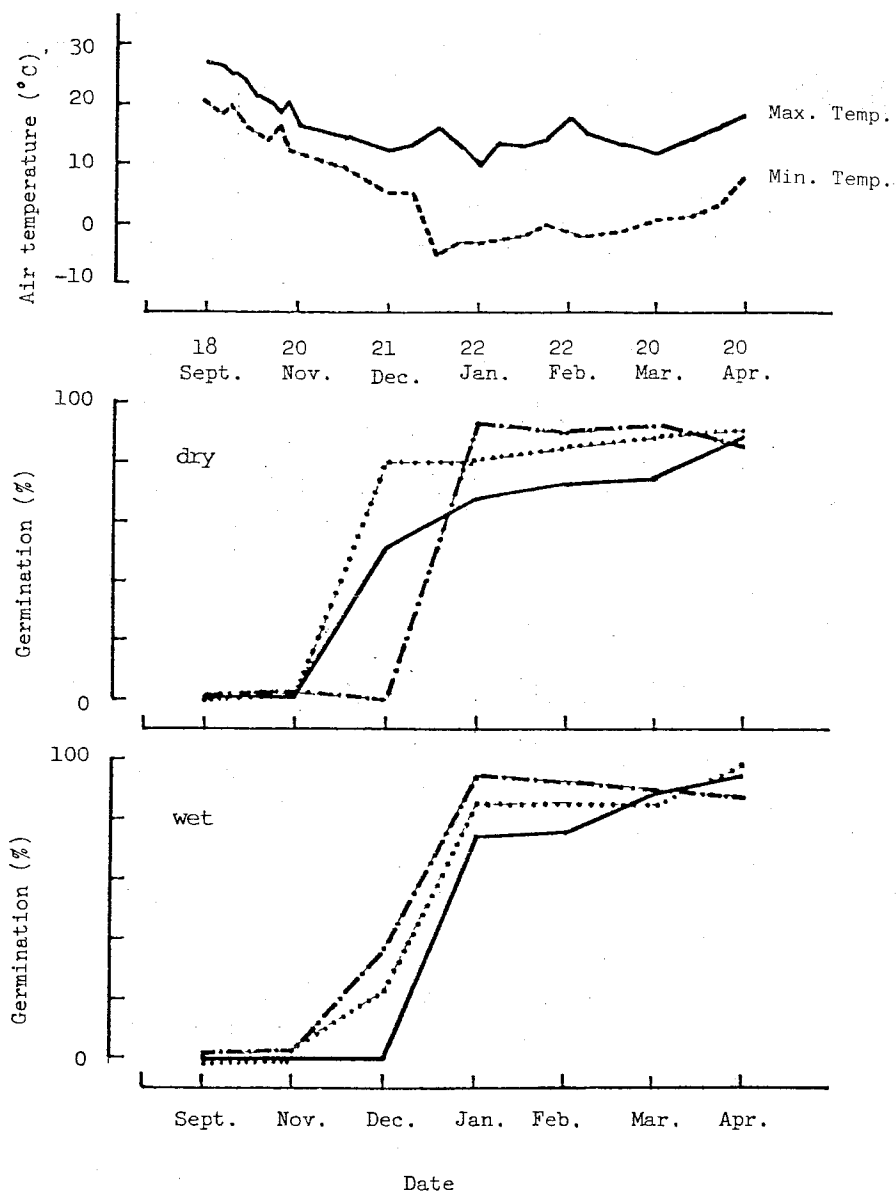


Figure 75. Germination of seed stored for dry and wet under field conditions in Kyoto, and weekly maximum and minimum air temperature in field.

— : Floating condition  
 ..... : Emerged condition  
 - . - : Upland condition

Table 41. Effect of storage for 12 months under wet and dry conditions at various temperatures on germination of seed produced in Kyoto.

| Storage condition |     | Germination ( % ) |         |        |
|-------------------|-----|-------------------|---------|--------|
|                   |     | Floating          | Emerged | Upland |
| 5° C              | wet | 96.00             | 96.00   | 92.00  |
|                   | dry | 76.67             | 32.67   | 13.33  |
| 10° C             | wet | 92.67             | 88.00   | 71.33  |
|                   | dry | 77.33             | 66.00   | 58.00  |
| 20° C             | wet | 50.00             | 66.00   | 26.67  |
|                   | dry | 92.67             | 86.00   | 78.00  |
| 30° C             | wet | 54.00             | 72.00   | 51.33  |
|                   | dry | 93.33             | 22.67   | 74.00  |
| In field          | wet | -                 | -       | -      |
|                   | dry | 84.67             | 79.33   | 93.33  |

なった。この時期はFig. 75に示した通り、最低気温が10℃以下となり日較差が大きくなる頃である。これより、ある一定期間の低温あるいは変温に遭遇する<sup>10)</sup>ことにより休眠が覚醒され、発芽好適条件が与えられると、すみやかに発芽が生じると推察された。

しかし、同様の実験を岡山産種子で行ったところ、異なる結果を得た。すなわち、9月下旬に採取した新鮮種子は、浮遊区で88%、抽水区で83%、陸生区で80%の発芽率を示した。同様に11月上旬に採取した新鮮種子も、Fig. 76に示した通り高い発芽率を示し、その後、湿潤状態では1ヶ月後の12月に、いずれの区も100%近い値を得、風乾状態でも2ヶ月後の1月に同じ状態となった。Fig. 75と比較すると、岡山産種子は京都産種子より休眠が浅いと推察されるが、このような差が生じる原因は解明できなかった。九州産種子や岡山産種子は休眠が浅いと芝山<sup>126)</sup>や富久<sup>149)</sup>が報告しているが、日本国内で、種子の休眠性について地理的変異が生じている可能性も考えられる。

以上、本章では、ホテイアオイの雑草性を把握する試みも兼ねて、種々の生息地における適応力を評価した。本来の浮遊状態以外の育成状態で生育特性を

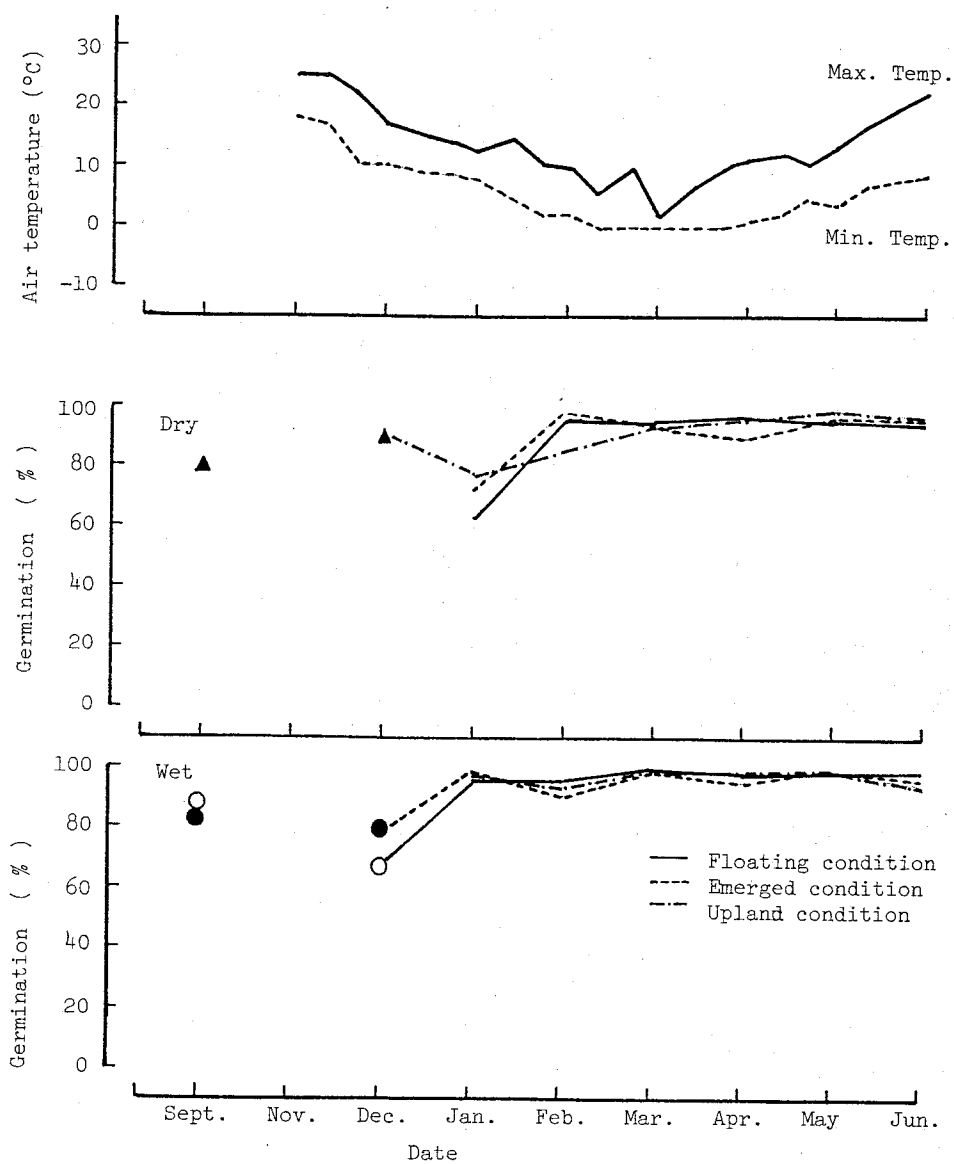


Figure 76. Germination of seed stored for dry and wet under field conditions in Okayama, and weekly maximum and minimum air temperature in field. ○ : Fresh seeds collected from the plant under floating condition, ● : Fresh seeds collected from the plant under emerged condition, ▲ : Fresh seeds collected from the plant under upland.



観察したところ、他の水生植物と同様に幅広く陸生状態でも生育可能で、特に抽水状態で生育良好という興味深い現象を得た。さらに、育成状態の変化に伴う内部形態の変化を調べた結果、生育障害を伴う大きな形態変化は認められず、地中根及び陸生化に伴う茎葉部の機械組織の発達、水分供給の減少に伴う気孔数の変化など、速やかに環境に適した内部形態に変わる可塑性を有することが判明した。

次に本草の種子繁殖であるが、本研究により、自然状態で充分結実することが確認され、かつ大気中でも結実可能であることが明らかにされた。現在、九州のクリーク地帯ならびに大阪府下の溜池で種子繁殖が確認されている。しかし、発芽特性に関しては90年以上も研究が続けられている<sup>78)</sup>にも拘らず、その結果は混沌としている。スリランカでは、採取後1ヶ月以内に発芽が認められている<sup>38)</sup>が、Hitchcockらの報告<sup>45)</sup>では、湿潤状態で10週間、風乾状態で16週間経なければ発芽しないと述べられている。

また、風乾貯蔵は湿潤貯蔵より有意に発芽率が低下するとも論じられている。<sup>78)</sup> 本研究では産地により休眠性の深さが異なる傾向が把握され、貯蔵条件も温度要因の影響が認められた。本草の種子は口紙上では発芽せず、カバーガラス処理による低酸素条件を必要とする現象などを含めて、今後は、生理・生化学的側面から発芽特性を究明することが望まれる。

## 第4節 摘 要

1. 本研究は、種々の育成状態下での生育特性、内部形態の観察及び種子繁殖を調べることにより、本草の環境への適応力を明らかにしようとしたものである。

2. 浮遊、抽水及び陸生状態で生育特性を比較すると、夏期及び冬期共、抽水状態が生育良好であり、畑作と同程度の土壤水分含量でも生育可能であった。総葉面積は陸生状態で減少し、植物体内の結合水は抽水状態で多かった。

3. 自然乾燥処理後の回復率は陸生>浮遊>抽水状態の順で高く、陸生状態では細胞液濃度が高く、乾燥可能度が一定して低かった。

4. 内部形態の変化を観察すると、地中根では皮層の細胞膜の肥厚が生じ、抽

水型では空隙部の拡大が認められた。同様に、茎葉部においても陸生化に伴う機械組織の発達が認められた。

5. 葉身の表裏両側に存在する気孔は、抽水型や陸生型では、その分布状態に変化は無かったが、数は有意に減少した。

6. 開花結実については、開花数及び着花数は抽水型で良好であったが、結実率及び1朔果中の種子数は育成状態間で有意差は無かった。一方、花粉の活性は30℃で最も高く、また、結実には受粉後の温度が20℃以上必要であった。

7. 種子の最適発芽温度は25℃～30℃、濃硫酸処理や凍結処理が休眠覚醒に有効であった。また、京都産種子は休眠性があり、低温湿潤貯蔵3ヶ月、高温風乾貯蔵4ヶ月を経ると発芽率が高まった。一方、岡山産種子は休眠が比較的浅かった。

## 第5章 総 合 考 察

水生雑草を適確に管理する為には、まず、その雑草が引き起こす問題を分析しなければならない。<sup>36)</sup> その上で、効率良い管理法を模索することが肝要である。しかしながら、問題を分析することは、単に雑草害を診断することを意味するのではなく、なぜ、そのような現象を引き起こしえたのか、雑草側の生理生態的特性を把握することであると考ええる。以上の観点から、本研究では、特にホテイアオイの旺盛な生育及び繁殖力に着目し、種々の環境要因に対するそれらの反応に関して詳細な検討を行ってきた。本章では、第1章から第4章までに得られた研究結果に考察を加え、その考察に基づいてホテイアオイの管理体系の一試案を提示した。

まず、緒論で水生雑草の台頭は水の富栄養化に伴う現象であると推測したが、ホテイアオイの場合も、その推測を肯定する知見が得られた。特に、窒素に対する本草の生育反応は顕著で、一般植物と比較して高い水中の窒素濃度でも生育が可能であり、また体内中の含有率も高い傾向を示した。窒素供試形態の嗜好生はpHが大きく関与したが、アンモニア態と硝酸態が共存する場合は、アンモニア態を優先して吸収する傾向が示唆された。上述の結果から、比較的、汚染の新しい水系では硝酸態よりアンモニア態が多く存在し、本草の生息地も、そのような水系であることが多く観察されていることから、その裏付けとなる生育特性が把握されたと考えられる。

次に、本草の温度に対する生育反応については、熱帯及び亜熱帯地域に繁茂する限りは、温度要因を考慮する必要は無く、従って、これらに関する知見は、今まで、ほとんど得られなかった。しかし、温帯地域に属する我が国においては季節に伴う温度変化は大きな要因として、本草の生育や繁殖に関与する。この点を究明する目的で第2章第1節及び第2節では、本草の生長の季節的变化を示唆する結果を求めた。すなわち、25℃～30℃における生育特性は夏期の生育盛期に相当するもので、新鮮重の増加や草高の伸長及び花梗形成が顕著に認められ、形成された新株の生長速度も早かった。一方、15℃～20℃は、春期及び秋期の生育状況と合致するもので、この温度範囲で子株形成数が急激に増し、

草高が減じ株が矮性化する現象は、特に11月頃の繁茂地で観察される。その後  
 に続く低温に備えて生育休止期に質的変換する直前の様相と考えられる。また、  
 いつ、この生育休止期に入るかが越冬に関与すると考えられるが、適期に休止  
 期に入り、低温に曝されることにより、ハードニング効果を得ると比較的越冬  
 性が高まることが第2章第3節で明らかにされた。しかし、生長点付近の微細  
 気象や寒波の緩和による解凍時の細胞崩壊及び側芽による再生など残された問  
 題は多い。Penfound<sup>102)</sup>は、ニューオーリンズ州で本草の低温障害を調査し、  
 越冬性の低さを強調しているが、Bock<sup>14)</sup>は、カリフォルニア州の観察から、熱  
 帯原産である本草が世界的な害草となったのは、低温に対して比較的強いこと  
 も一因であると述べている。温帯地域に生息するホテイアオイは、熱帯地域  
 のものと比べ、低温で順化されることにより、耐寒性及び耐凍性に関して分化が  
 生じていると推察されるが、今後の解明が期待される。

第1章及び第2章の知見を総合判断する目的で、第3章では自然水系におけ  
 る本草の生産量と群落構造の解析を試みた。その結果、本草の生長は水中の栄  
 養塩や温度などの外的環境要因以外に、群落の生長に伴う密度効果などの群落  
 構造が生長の制限因子になることが解明された。従って、我が国において、季  
 節性を考慮して本草の群落形成の様相を検討するとFig. 77 に示す通りとなっ  
 た。すなわち、Phase 1 は、5月～6月の季節に相当し、本草の生育が活発に開始

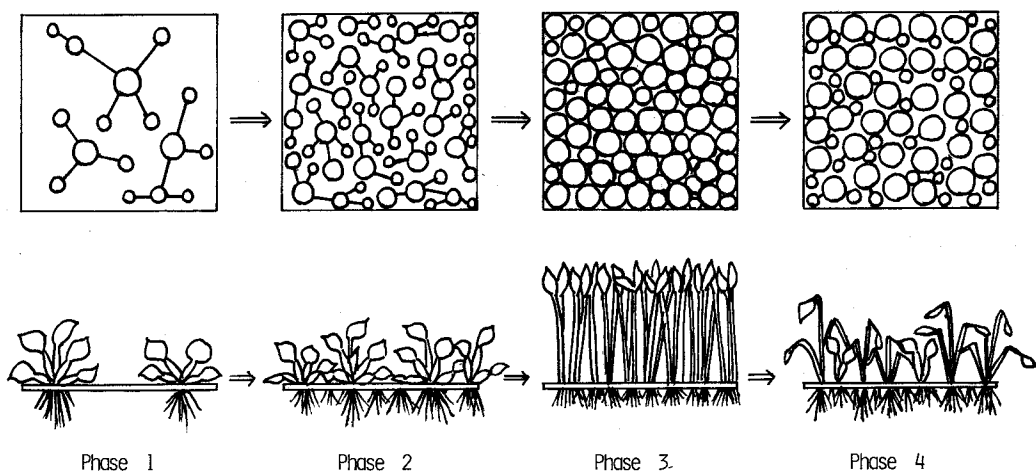


Figure 77. Diagram of formation of waterhyacinth population.

される時期である。空間も広く、相対生長率及び群落生長速度が最大の時である。Phase 2は被度100%になる直前までの時期で、子株増加による水平方向の生長から、伸長生長に変換する時である。Phase 3は、自己間引き現象による最適密度を維持しながら、安定した伸長生長による生産量の増加が認められる時期である。Phase 2及びPhase 3が生育盛期の群落構造である。次に、Phase 4は、生育盛期が過ぎ、降霜など低温に遭遇することにより茎葉部が枯れ、株が小型化する11月頃の様相を示している。温帯地域では、このような群落の消長を繰り返していると推定される。また、その生産量であるが、Table 42に諸外国で調査された生物量を列挙して比較検討した。人工栽培などを除き、自然水域のみ取りあげても、排水流入の有無や調査時期の違いによる生物量の差はあるが、我が国の値はさほど低い値ではない。異常繁茂に苦慮する状況が、この値から類推できよう。

ところで、本草が観賞植物から雑草へ転化した大きな原因は、本草が有する種々の生息地における速やかな適応力と推察される。本来、浮遊性である本草が、抽水型で生育良好であることを第4章で把握したが、これは、生息地の水位低下による環境変化に左右されずに生息でき、また、中途半端な撤去作業は水際で生存可能となる傾向を示唆するものである。しかし、冬期の水位低下は乾燥害と寒害の相乗作用で防除に効果的と推察される知見も得られた。既にア

Table 42. Comparison of biomass reported by different authors.

| Date | source                       | Biomass<br>(kg dry wt./m <sup>2</sup> ) | Locality    |
|------|------------------------------|---|-------------|
|      | Wiiten et al. (1971)         | 2.97                                    | Iowa        |
|      | Penfound & Earle (1948)      | 1.28                                    | New Orleans |
|      | Boyd & E. Scarsbrook (1975)  | 2.13                                    | Alabama     |
|      | Knipling et al. (1970)       | 2.50                                    | Florida     |
|      | Westlake (1963)              | 1.50                                    | Louisiana   |
|      | Center & Spencer (1974-1975) | 2.30 - 2.50                             | Florida     |
|      | Sahai et al (1969)           | 0.46 - 0.72                             | India       |
|      | Ueki et al (1970)            | 0.51 - 1.28                             | Osaka       |
|      | Okii et al (1980)            | 1.80 - 2.06                             | Okayama     |

メリカでは、冬期の水位低下による生態的除法による水生雑草の管理も試みられている。<sup>109)</sup>

一方、本草の種子繁殖に関しては、旺盛な生産力の担い手は無性繁殖であっても、種子の存在は無視できない。越冬株が枯死した場合、種子発芽による翌夏の繁茂の可能性も考慮する必要がある。しかも、種子の寿命は二次休眠により維持される傾向も把握された。

さて、以上の考察を踏まえて、ホテイアオイの管理体系の組み立てを試みよう。

ホテイアオイの生産性の高さは衆目の一致するところで、それ故にホテイアオイ群落の異常繁茂に悩まされているわけである。この現象を逆手に利用して、バイオマス資源として本草を利用する発想が生じていても不思議ではない。バイオマスの活用が注目を集めている昨今、異常繁茂した植物を撤去することのみ労力や経費を費すことは無駄と考えられる。特に、水生雑草の場合、機械的防除手法が主流を占めているが経費の高くつく点が欠点である。<sup>21, 88)</sup> 従って、取りあげた収穫物を再利用する循環システムが組み立てられれば、撤去作業に費す費用も無駄にはならない。

一方、本草の利用化は、エネルギー源のみならず、多方面に可能性を有している。そこで、本草を積極的に利用することにより管理するフローチャートをFig. 78に示した。Fig. 78によると、ホテイアオイ・ラグーンより上部の過程が機械的防除手法に準じる部分である。第1章で明らかにしたように、本草は富栄養化の進んだ水系で繁殖する。これは、観点を変ずれば、窒素、リン及び重金属類の吸収、すなわち水質浄化の役目を担うことになる。浄化された水は再利用され、収穫された植物体はメタンガス発酵に回され、エネルギー源となる。

ところで、エネルギー源以外の利用サブシステムは、同列させた通り、肥料・マルチ・土壌改良剤として農地に還元するか、飼料用として家畜に還元するか、あるいは緑葉タンパク質源や工業資源として人間社会に還元することが考えられる。しかし、これらの多目的に本草を利用する場合、水質汚染の進んだ水系で繁茂した本草を直接使用することは危険性を伴う。そこで考案されるのが、

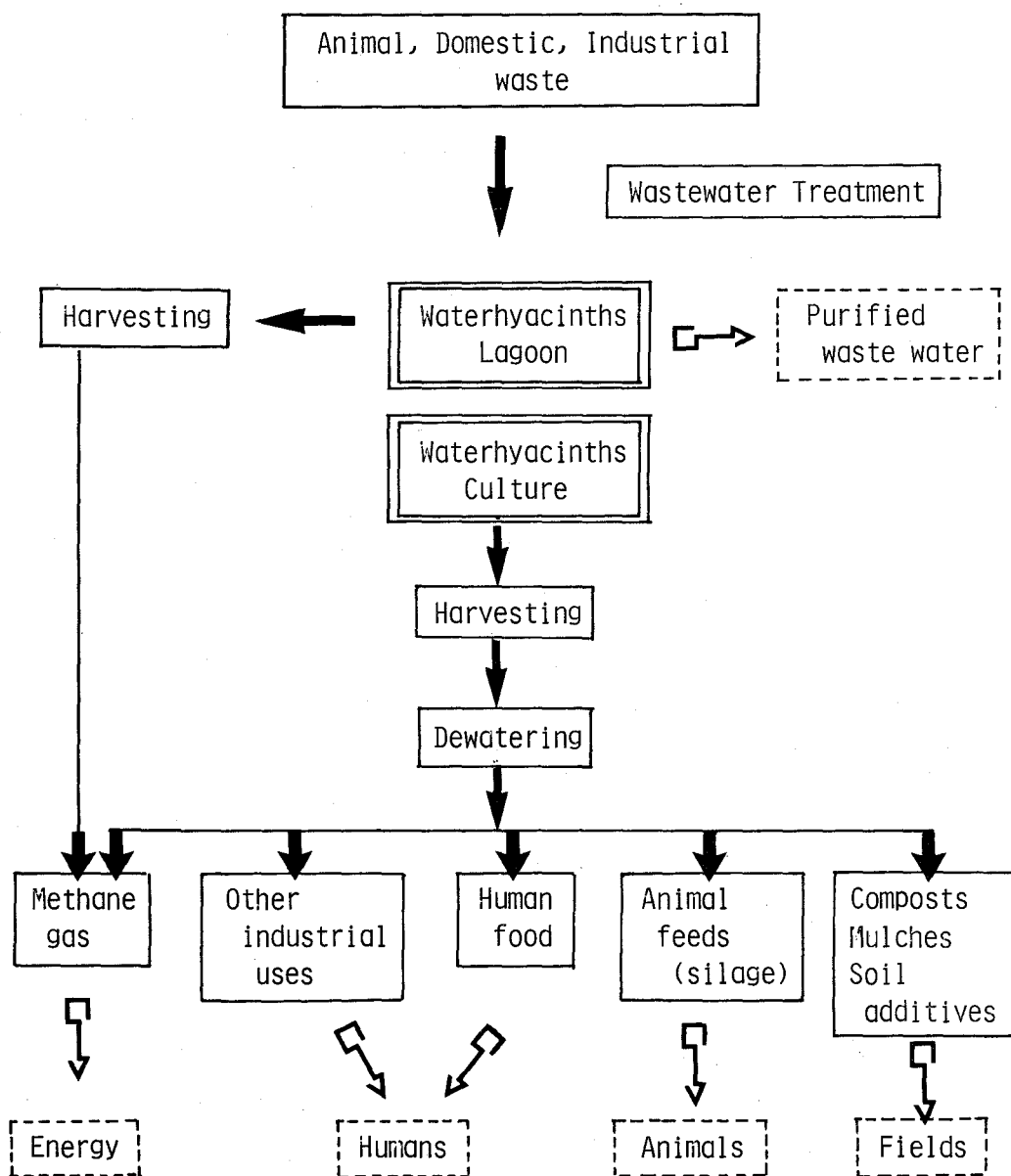


Figure 78. Flow scheme for waterhyacinth utilization.

雑草を資源植物として栽培するシステムである。

Table42に示された値を、さらに高める為、収穫量や収穫回数などを検討して最適栽培システムを確立する必要がある。この場合、本草が逸脱しないよう管理することは言うまでもない。その上、効率良い収穫システムと脱水システム<sup>7)</sup>の開発も望まれる。なぜならば、第4章第1節で論じた本草の含水率の高さが種々の利用システムへの加工処理過程で関与するからである。

現在に至るまで、ホテアオイに関しては、機械的、化学的あるいは生物的防除法など種々の防除法が検討され、本草の完全な駆除に研究が注がれてきた。ところが、本草を利用することにより繁茂したホテアオイを駆除する手法が諸地域で試案され、さらに一步進めて、本章で提示したように、資源植物として栽培する方向にまで研究を進めることは非常に大きな発想の転換と考えられる。しかしながら、ホテアオイの管理体系がすべて積極的利用化への流れに集約されることを意味するのではなく、一方では従来通り、効率的な防除法の研究を探索する必要がある、過剰な繁茂に対しては制御を加えなければならない。本章で提示した管理体系の主眼は防除と利用をうまく使いわけて雑草を生かしながら管理することにある。この発想は、現在、アメリカなどの先進国と共に、<sup>76,108)</sup>東南アジア及びアフリカ諸国にも浸透され始めている。おりしも、近年、急速に新資源開発が進められている。この世相に対応すべく雑草の管理体系に積極的な利用化を組み込むことは自然の流れであり、その意味では本章で提示したホテアオイの管理体系の一試案は、将来の展望を考慮した新しい雑草管理を示唆するものと思える。



近年、水系の富栄養化は全世界共通の深刻な問題となっており、この現象が水界の生物相に異変を与え、旺盛な繁殖力を有する水生植物を大繁茂させる引き金となっている。従って、水生植物の中で水生雑草とみなされた種の防除に関する文献は枚挙にいとまない。しかしながら、適確な防除体系は、いまだ確立していない。その理由として、対象となる水系の用途の多面性から安易に化学的防除が行えず、防除体系の普遍性が困難なこと、水系の富栄養化を阻止する有効な手段が投じられていないこと、そして、水生雑草の繁殖のメカニズムが解明されていないことがあげられよう。

ところで、この防除困難な水生雑草のひとつにホテイアオイがあり、我が国でも各地で旺盛な繁殖が問題視され公害雑草として注目されている。現在、繁茂地では多大の労力と費用を要して機械的除去を行い、その対策に苦慮している。今後、本草の管理体系を確立する上で、旺盛な生育及び繁殖力のメカニズムを解明する為に、生理生態的特性を追求する基礎研究は重要な意義を有する。

本研究は、以上の立場から、我が国では、まだ歴史の浅い水生雑草の管理体系を確立することを念頭におき、環境要因に対するホテイアオイの生育反応及び繁殖力を解明した。すなわち、水中の栄養塩類や温度に対する生育反応を究明し、次に繁茂地での現況を把握する目的で、自然水域における生産量調査や群落構造の解析を行った。一方、種々の生息地に速やかに適応する能力を有していることに着眼して、その場合の生育特性と種子繁殖の可能性を検討した。さらに、これらの実験結果に基づいて、本草の防除のみならず利用化への試みも含めた管理体系の確立について考察を加えた。それらの研究成果の概要は以下のごとくである。

1. 水中の栄養塩とホテイアオイの生育及び繁殖との関係を検討した結果は、次の通りである。

(1) 要素欠除試験から、窒素、リン及びカルシウム欠除区で顕著な生育阻害が認められ、阻害された植物体では共通して茎葉部のリン含有率が低いことが

明らかになった。

(2) 好適窒素 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 濃度は、成株の生長と繁殖において異なり、また、植物体の齡によっても異なった。すなわち、成株の生育は 20 ppm 以上で良好で、160 ppm で最大となったが、子株形成及び幼株の生育量は 40 ppm で最大となった。

(3) pH 7.0 で最も生育が良く、窒素 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 濃度 20 ppm の場合は 160 ppm と比較して、好適 pH の範囲が広がった。

(4) アンモニア態区及びアンモニア態と硝酸態の混合区は、中性から塩基性側で生育が促進され、一方、硝酸態区は酸性側で生育良好であった。各窒素形態間及び pH 間で無機成分含有率の増減が大きく影響されるのは、アンモニア態区であった。

(5) リン ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 濃度 20 ppm 以上で生育促進が顕著で、リンの供給増加と共に著しい茎葉部のリン含有率増加が認められた。

(6) カルシウム ( $\text{CaO}$ ) 濃度 5 ppm が生育阻害を生じる最低限界濃度であった。カルシウム供給増加に伴う茎葉部のカルシウム含有率増加は認められなかった。

2. 温度と実生株及び成株の生育や繁殖との関係、さらに低温に対する反応を調べた結果は次の通りである。

(1) 発芽は高温区で促進されたが、15℃区でも発芽率は高かった。

(2) 実生株の種々の温度 (15℃, 20℃, 25℃, 及び 30℃) に対する生育反応は以下の通りである。

i) 初期生育は 2 週間以内は温度による生育差が生じたが、4 週間後は 25℃ と 30℃ で大差が無くなった。また、抽水区が沈水区より生育が促進された。

ii) 30℃ 区では形成された新個体の生育が優先されるのに対し、20℃ 区では新個体を形成することが優先される傾向を認めた。

iii) 花梗の形成時期及び形成数は有意に高温区で早く、かつ多かった。また、花梗数と子株数との相関は 30℃ 区と 20℃ 区で高かった。

(3) 成株の種々の温度 (15℃, 20℃, 25℃ 及び 30℃) に対する生育反応は以

下の通りである。

i) 実生株と同様に低温区で新個体の形成数が多く、矮小化が認められた。

ii) 乾物重増加は温度条件により有意に異なったが、25℃区と30℃区は差が認められず、双方共最適生育温度と考えられた。また、花梗形成も高温区で優れ、積算温度が関与していると推察された。

(4) 我が国における本草の分布北限は、1月の月平均気温1℃、年平均気温13℃及び最寒月の日最低気温平均値-3℃の等温線と一致した。

(5) 自然状態での低温に対する反応は以下の通りである。

i) 結氷しない水温下でも茎葉部が極度の低温に曝された場合は枯死した。

ii) ハードニングの影響により0℃以下の遭遇日数と生存率との相関は認められなかった。また、小型株と大型株では生存率が異なった。

iii) 頂芽は結氷による障害が大きかったが、側芽の生存による再生が多く観察された。また、頂芽の枯死率は-1℃~1℃の葉温及び水温の暴露時間の増加に対して、指数関数的に高まった。

3. 自然水域におけるホテイアオイの生産量及び群落構造の動態を調査した。それらの結果は次の通りである。

(1) 最大増殖が実現した場合の $\overline{RGR}$ は0.08~0.33/dayの範囲で、その季節的变化は平均気温のそれと同じ傾向を示した。

(2) 被度100%に達するまでは、 $\overline{RGR}$ は高く、倍加日数も7日以内であったが、その後の収穫管理により平均0.05~0.06/dayの $\overline{RGR}$ が維持された。一方、自然放置区では個体群の生長が進むに伴い自己間引き現象が認められた。

(3) 収穫管理区の草高の度数分布は個体群の生育初期と後期には背ぞろい現象が認められ、中期は中高の正規分布を維持した。自然放置区は、生育が進むと共に分布幅が広がり、尖度の低い分布型を示した。

(4) 自然放置区では現存量が20~25kg fresh wt./m<sup>2</sup>に達するまでは指数関数的生長を行い、全生長過程はロジスチック曲線に適合した。また、伸長生長が現存量増加に促進的に作用した。本調査中の全収穫量は2.67~2.79kg dry wt./m<sup>2</sup>であった。

(5) 窒素及びリンの体内含有率は葉期別に有意差が生じた。収穫管理区における個体群の両成分の平均含有率は窒素が3.06~3.57%、リンが0.505~0.696%であった。

(6) 栄養塩類の負荷量が異なる3水系で、生産量と窒素及びリンの体内含有率を比較検討した結果は以下の通りである。

i) 生産量は、比較的富栄養化の進んでいない水系で最大値を得た。

ii) 茎葉部における窒素含有率は水系間及び季節間に差はなかったが根部は有意差があり、富栄養化の進んだ水系の植物体が高かった。

iii) リン含有率は茎葉部、根部共に水中のリン濃度の高い水系で極めて高い値を示した。

iv) 個体群による窒素及びリン蓄積量は、植物体内の含有率より現存量との相関が高かった。

4. 種々の育成状態下での生育特性、内部形態の観察及び種子繁殖を調べることにより、本草の環境への適応力を究明した。それらの結果は次の通りである。

(1) 浮遊、抽水及び陸生状態で生育特性を比較すると、夏期及び冬期共、抽水状態が生育良好であり、畑作と同程度の土壤水分含量でも生育可能であった。総葉面積は陸生状態で減少し、植物体内の結合水は抽水状態で多かった。

(2) 自然乾燥処理後の回復率は陸生>浮遊>抽水状態の順で高く、陸生状態では細胞液濃度が高く、乾燥可能性が一定して低かった。

(3) 内部形態の変化を観察すると、地中根では皮層の細胞膜の肥厚が生じ、抽水型では空隙部の拡大が認められた。同様に、茎葉部においても陸生化に伴う機械組織の発達が認められた。

(4) 葉身の表裏両側に存在する気孔は、抽水型や陸生型では、その分布状態に変化は無かったが、数は有意に減少した。

(5) 開花結実については、開花数及び着花数は抽水型で良好であったが、結実率及び1朔果中の種子数は各処理区で有意差は無かった。また、花粉の活性は30℃で最も高く、結実には受粉後の温度が20℃以上を要した。

(6) 種子の最適発芽温度は25℃～30℃、濃硫酸処理や凍結処理が休眠覚醒に有効であった。また、京都産種子は休眠性があり、低温湿潤貯蔵3ヶ月、高温風乾貯蔵4ヶ月を経ると発芽率が高まったが、岡山産種子は休眠が比較的浅かった。

5. これまでの実験結果に基づき、ホテイアオイの管理体系について考察を加えた。

現在、機械的防除手法が唯一の管理法であるが、本草の温帯地域における生育特性を把握した結果、富栄養化の進んだ水系で繁殖することを逆手にとり、水質浄化の役目を担わした後、収穫物をエネルギー源に再利用するなど、積極的な利用化を組み込んだ管理体系が有効であることが示唆された。

## 引用文献

1. Agharkar, S.P. and I. Banerji: Studies on the pollination and seed formation of water hyacinth. *Agri. J. India* 35, 286 (1930).
2. Anderson, R.G.: Comparative studies of the morphology and ecology of sexual reproduction of E. crassipes. Ph.D. Thesis, 204pp (1976).
3. Arber, A.: Water plants. Wheldon & Wesley Ltd., New York (1963).
4. 有門博樹: 通気組織系と作物の耐湿性, 定年退官記念出版会 (1975).
5. Arnold, C.A.: A note on the origin of the lateral rootlets of E. crassipes. *Amer. J. Bot.* 27, 728-730 (1940).
6. Backer, C.A.: Pontederiaceae. *Flora malesiana*, Ser. 1(4), 255 (1951).
7. Bagnall, L.O.: Pressing characteristics of waterhyacinth. *J. Aquatic Plant Management* 14, 71-75 (1976).
8. Barrett, S.C.H.: Sexual reproduction in Eichhornia crassipes. 1. Fertility of clones from diverse regions. *J. Applied Ecology* 17, 101-112 (1980).
9. \_\_\_\_\_: Sexual reproduction in E. crassipes. 2. Seed production in natural
10. Barton, L.V. and J.E. Hotchkiss: Germination of seeds of E. crassipes Solms. *Contri. from Boyce Thompson Inst.* 16, 215-220 (1951).
11. Beckenbach, J.R. et al.: Nutrition studies with corn: 3..A statistical interpretation of the relation between nutrient ion conceatration and the carbohydrate and nitrogenous content of the tissue. *Soil Sci.* 49, 219 (1940).
12. Bennett, W.F. et al.: Effect of nitrate and ammonium on growth of corn in nutrient solution sand culture. *Agronomy J.* 56, 342-345 (1964).
13. Berg, A.: The ecological role of waters of the Congo basin in the growth of water hyacinth. *Mim Classe Sci. Nat. med. Acad. roy. Sci.d' Outre Mer.* 12(3), 120 (1961).
14. Bock, J.H.: An ecological study of Eichhornia crassipes with special emphasis on its reproductive biology. Doctorial Thesis, California (1966).
15. \_\_\_\_\_: Productivity of the water hyacinth. *Ecology* 50(3), 460-464 (1969).
16. Boyd, C. E.: Vascular aquatic plants for mineral nutrient removal from polluted waters. *Economic Botany* 24, 95-103 (1970).

17. \_\_\_\_\_ and D.H. Vickers: Variation in the elemental content of Eichhornia crassipes. Hydrobiologia 38(3-4), 409-414 (1971).
18. \_\_\_\_\_ and E. Scarsbrook: Influence of nutrient additions and initial density of plants on production of waterhyacinth. Aquatic Botany 1, 253-261 (1975).
19. \_\_\_\_\_: Accumulation of dry matter, nitrogen and phosphorus by cultivated water hyacinth. Economic Botany 30, 51-56 (1976).
20. Brühl, P. and J.S. Gupta: Commentations phytomorphological. 4. Eichhornia studies., 3. On the production of ripe seeds by artificial pollination of Eichhornia speciosa. J. the Department of Sci. Univ., of Calcutta (India) 8, 1-8 (1927).
21. Bryant, C.B.: Aquatic weed harvesting costs and equipment-1972. J. Aquatic Plant Management 12, 53-55 (1974).
22. Center, T.D. and N.R. Spencer: The phenology and growth of waterhyacinth in a eutrophic north-central Florida Lake. Aquatic Botany 10, 1-32 (1981).
23. Chibbar, S.S. and D.G. Singh: Paddy straw and waterhyacinth silage. Indian Farming 20(11), 24-26 (1971).
24. 筑後川下流農業水利事業クリーク水路施工方式検討専門委員会: 筑後川下流域のクリークにおける水生雑草の生態および防除 49pp (1980).
25. Clark, G.E. and J.W. Shive: The influence of the pH of a culture solution on the rates of absorption of ammonium and nitrate nitrogen by the tomato plants. Soil Sci. 37, 202-225 (1934).
26. \_\_\_\_\_: Effect of ammonium and of nitrate nitrogen on the composition of the tomato plant. Plant Physiol. 11(1), 5-24 (1936).
27. Cooley, T.N. et al.: Radio-manganese, -iron and -phosphorus uptake by waterhyacinth and economic implication. Economic Botany 32(4), 371-378 (1978).
28. Couch, R. et al.: Effects of a CO<sub>2</sub> laser on waterhyacinths. Proc. 23rd a Meet. sth. Weed Sci. Soc. 229 (1970).
29. Debusk, T.A. and J.H. Ryther: Effects of seasonality and plant density on the Productivity of some freshwater macrophytes. Aquatic Botany 10, 133-142 (1981).
30. Downs, R.J. and H. Hellmers (小西通夫訳): Environment and the experimental control of plant growth. 学会出版センター, 東京 (1975).

31. Easley, J.F. and R.L. Shirley: Nutrient elements for livestock in aquatic plants. Hyacinth Control Journal 12(May), 82-85 (1974).
32. Engel, H.: Die Wirkung der Ammoniumsalze in ihrer Abhängigkeit von der Wasserstoffionenkonzentration. Ztsch. f. Pflanzener. Dung. u. Bodenk 16(A). 226-233 (1930).
33. Evans, A.C.: The grip of the water hyacinth. New Scient 19, 666-668 (1963).
34. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rep.F.A.O.Conf.Quelea Bird Wat. Hyacinth Control in Afr. 6-13 (1965).
35. Frank, P.A.: Degradation and effects of herbicides in water. FAO International Conf. on Weed Control (1970).
36. Fryer, J.D. and S. Matsunaka (edit.): Integrated control of weeds. Univ. of Tokyo Press, Tokyo, 121-150 (1977).
37. Ginburg. J.M.: Composition and appearance of soybean plants grown in culture solutions each lacking a different essential element. Soil Science 20(1). 1-13 (1925).
38. Haigh, J.C.: Notes on the water hyacinth in Ceylon. The Ceylon J. Sci.(A) 12(2), 94-107 (1936).
39. Haller, W.T. and D.L. Sutton: Effect of pH and high phosphorus concentrations on growth of waterhyacinth. Hyacinth Control J. 11(June), 59-63 (1973).
40. 半沢洵: 雑草学 (全), 六盟館, 114 (1910).
41. 原田市太郎: 水草の形態・細胞などのあれこれ, 遺伝28 (8), 4-11 (1974).
42. Hasman, M. and N. Inanc: Investigations on the anatomical structure of certain submerged, floating and amphibious hydrophytes. Istanbul Univ. Fen Fakult. Mecmuasi 22(3), 137-153 (1957).
43. Hestand, R.S. and C.C. Carter: The effects of a winter drawdown on aquatic vegetation in a shallow water reservoir. Hyacinth Control J. 12, 9-12 (1974).
44. \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_: Succession of aquatic vegetation in Lake Ocklawaha two growing seasons following a winter drawdown. Hyacinth Control J. 13, 43-47 (1975).
45. Hitchcock, A.E. et al.: Waterhyacinth; its growth, reproduction and practical control by 2,4-D. Contributions from Boyce Thompson Institute 15, 363-401 (1949).



46. \_\_\_\_\_: Growth and reproduction of water hyacinth and alligator weed and their control by means of 2,4-D. Contributions from Boyce Thompson Institute 16, 91-130 (1950).
47. 生嶋功: 水界植物群落の物質生産 I. -水生植物-, 生態学講座 7, 共立出版, 98pp (1972).
48. 石井林寧・井上頼数編: 最新園芸大辞典 No.2, 誠文堂新光社, 760-761 (1972).
49. Iswaran, V. et al.: Azotobacter chroococcum in the phyllosphere of waterhyacinth. Plant and Soil 39(2), 461-463 (1973).
50. 岩井巖・園田洋次・大野伸也: 作物のカルシウム栄養に関する研究 (第5報) 岐阜大農研報 12, 189-197 (1960).
51. 岩田正利 谷内武信: 窒素形態の差異と蔬菜の生育, 園芸学会雑誌22(3), 183-192 (1953).
52. \_\_\_\_\_: 窒素形態の差異と蔬菜の生育, 園芸学会雑誌 31(1), 39-52 (1962).
53. 伊沢悟郎: 禾本科作物による無機窒素の吸収同化に関する肥料学的基礎研究, 兵庫農科大学紀要12, 11-17 (1964).
54. Johannes, H.: Importance of aquatic weeds in warm climates. Berichte aus der Abteilung fur Herbologie an der Universitat. Hohenheim 3, 15-25 (1972).
55. 笠原安夫: 日本雑草図説, 養賢堂, 東京 (1964).
56. 喜納政修: 新しい生物学的処理技術総覧, 309-319 (1978).
57. Knipling, E.B. et al.: Growth characteristics, yield potential and nutritive content of water hyacinth. Proc. Soil and Crop Sci. Soc. 30, 51-63 (1970).
58. 小林章・中川昌一: 農業及び園芸 24, 467 (1949).
59. 河野昭一: 種と進化, 三省堂, 東京, (07-117 (1969).
60. 熊沢喜久雄: 植物栄養学大要第5章植物必須元素の生理作用, 養賢堂, 76-158 (1974).
61. Lawrence, J.M. and W.W. Mixon: Comparative nutrient content of aquatic plants from different habitats. Proc. 23rd Annual meeting of the southern weed Sci. Soc., 306-310 (1970).
62. Levitt, J.: The hardiness of plants. Academic Press, New York (1956).
63. Little, E.C.S.: Progress report on transpiration of some tropical water weeds. PANS(C) 13(2), 127-132 (1967).

64. \_\_\_\_\_: The control of water weeds. Weed Res. 8, 79-105 (1968).
65. \_\_\_\_\_ and I.E. Henson: The water content of some important tropical water weeds. PANS(C) 13(3), 223-227 (1971).
66. Matthews, L.J.: Seedling establishment of water hyacinth. PANS(C) 13(1), 7-8 (1971).
67. \_\_\_\_\_: Waterhyacinth-a million dollar menace. New Zealand J. of Agr. 84, 41 (1971).
68. Minshall, W.H. and G.W. Scarth: Effect of growth in acid media on the morphology, hydrogen-ion concentrations, viscosity and permeability of water hyacinth and frobit root cells. Canad. J. Bot. 32, 188-208 (1952).
69. Mitchell, D.S. (edit.): Aquatic vegetation and its use and control. Unesco, Paris, 134pp (1974).
70. Naftel, J.A.: The absorption of  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{NO}_3\text{-N}$  by various plants at different stages of trowth. J. Amer. Soc. Agron. 23, 142-158 (1931).
71. 中西克爾: 水生被子植物の気孔の形態と分布, 植物と自然11 (5), 6-10 (1977).
72. 中島庸三: 2,3の水生植物の種子発芽に関する研究, 植物学雑誌42, 576 (1928).
73. 中山 包: 発芽生理学, 内田老鶴園新社, 東京, 310-320 (1970).
74. Newton, J.D.: A comparison of the absorption of inorganic elements and of the buffer systems of legumes and non-legumes, and its bearing upon existing theories. Soil Sci. 15, 181 (1923).
75. 野口弥吉: 水稻に対する加里の効果, 養賢堂, 東京 (1949).
76. NSTL Station: Waterhyacinth wastewater treatment design manual. Washington, 91pp (1980).
77. Obeid, M. and M.J. Chadwick: Some factors affecting the growth of two aquatic weed species of the Nile-Waterhyacinth and water lettuce. Proc. 7th Br. Weed Control Conf., 548-552 (1964).
78. \_\_\_\_\_ and M.T. Seed: Factors affecting dormancy and germination of seeds of Eichhornia crassipes from the Nile. Weed Research 16, 71-80 (1976).

79. 大垣健吉：江津湖に乱発生するホテイアオイの生態に関する調査, 36pp (1969).
80. \_\_\_\_\_：ホテイアオイのメカニズムとその特性に関する研究報告書, 34pp (1974).
81. 小川房人：個体群の構造と機能. 植物生態学講座 5, 朝倉書店, 221pp (1980).
82. Ogura, H.: A note on the lateral root formation of Eichhornia crassipes. Ecol. Rev. 14(4), 305-309 (1958).
83. 岡山県立農業試験場作物部：ホテイアオイの効率的防除法に関する研究, 43pp (1980).
84. 沖陽子他：ホテイアオイの生育及び繁殖に関する研究第1報, 雑草研究23(3), 15-20 (1978).
85. \_\_\_\_\_他：同上第2報 雑草研究23 (3), 20-25 (1978).
86. \_\_\_\_\_他：水生雑草ホテイアオイに関する研究 IV. 種々の育成状態における生育特性, 雑草研究23 (別号), 207-209 (1978).
87. \_\_\_\_\_他：同上 V. 種々の育成状態における開花結実特性, 雑草研究23 (別号), 210-212 (1978).
88. \_\_\_\_\_：水生雑草ホテイアオイをめぐる諸問題, 農業技術35 (11), 15-21 (1980).
89. \_\_\_\_\_他：水生雑草ホテイアオイに関する研究 IV. 温度と実生の生育特性との関係, 雑草研究25 (別号), 85-86 (1980).
90. \_\_\_\_\_：中川恭二郎：自然水域におけるホテイアオイ個体群の生長と群落構造の解析, 文部省「環境科学」特別研究, 115-140 (1981).
91. Oki, Y. et al.: Production and nutrient removal potentials of Eichhornia crassipes in Japan. Proc. of the 8th APWSS Conf., 113-118 (1981).
92. 沖陽子：植木邦和：種々の育成状態におけるホテイアオイの組織学的研究, 雑草研究26 (4), 291-297 (1981).
93. 奥田東・下瀬昇：作物の窒素代謝に関する研究, 日土肥雑 22 (2), 6-8 (1951).
94. Olive, E.W.: Contributions to the histology of the Pontederiaceae. Bot. Gaz. 19, 178-184 (1894).
95. Orens, W.H. and D.L. Sutton: Removal of phosphorus from static sewage effluent by waterhyacinth. Hyacinth Control J. 13, 56-61 (1975).
96. 大滝末男・石戸忠：日本水生植物図鑑, 北隆館, 東京, 318 (1980).
97. Parija, P.: A preliminary note on the physiology of the seedlings of the water hyacinth. Agricultural J. of India 15(5), 386-391 (1930).
98. \_\_\_\_\_：Physiological investigations on water hyacinth in Orissa with notes on some other aquatic weed. Indian J. Agr. Sci. 4, 399-420 (1934).

99. Parker. F.W. and E. Truog: The relation between the calcium and the nitrogen content of plants and the function of calcium. Soil Sci. 10, 49 (1920).
100. Parra, J.V. and C.C. Hortenstine: Plant nutritional content of some Florida water hyacinths and response by Pearl Millet to incorporation of water hyacinths in three soil types. Hyacinth Control J. 12, 85-90 (1974).
101. Parsons, W.T.: Waterhyacinth; A pest of world waterways. J. Agri. Vict. Dep. Agric. 9, 23-27 (1963).
102. Penfound WM. T. and T.T. Earle: The biology of the water hyacinth. Biological Monographs 18(4), 447-472 (1947).
103. Pettet, A.: Seedlings of Eichhornia crassipes; a possible complication to control measures in the Sudan. Nature 201(Feb), 516-517 (1964).
104. Pieterse, A.H. et al.: Inhibition of float faomation in water hyacinth by gibberellic acid. Nature 260(5550), 423-427 (1976).
105. \_\_\_\_\_: The water hyacinth-a review. Abstracts on tropical agriculture 4(2), 9-42 (1978)..
106. Pirschle, K.: Nitrate and Ammonsalze als Stickstoffquellen fur hohere pflanzen bei konstanter Wasserstoffionenkenzentration. Ber. deutsch. Bot. Gesell. 47, 86-92 (1929).
108. Reed, S.C. and R.K. Bastian: Aquaculture systems for wastewater treatment. Washington, 126pp (1980).
109. Richardson, L.V.: Water level manipulation: A tool for aquatic weed. J. Aquatic Plant Management 13, 8-11 (1975).
110. Robertson, H.F. and B.A. Thein: The occurrence of water hyacinth seedlings under natural conditions in Burma Agriculture and Live-Stock in India 2,383-390 (1932).
111. Rogers, H.H. and D.E. Davis: Nutrient removal by waterhyacinth. Weed Science 20(5), 423-428 (1972).
112. Sahai, R. and A.B. Sinha: Contribution to the ecology of indian aquatics; 1. Seasonal changes in biomass of water hyacinth. Hydrobiol. 35, 376-382 (1969).

113. 酒井昭：クリの枝の凍害 第1報. 園芸学会昭和40年度春季大会研究発表要旨 (1965).
114. \_\_\_\_\_：植物の寒害と耐凍性, 雪氷34 (1), 44-53 (1972).
115. \_\_\_\_\_：植物の耐寒性, 植物と自然 13 (14), 6-10 (1979).
116. 酒井英市：ホテイアオイによる豚ふん尿汚水の浄化処理, 畜産の研究27 (4), 533-538 (1973).
117. 坂村 徹：植物栄養窒素源としての硝酸とアンモニアの吸収, 植物及動物 7(1), 63-72 (1939).
118. 作物分析法委員会編：栽培植物分析測定法, 養賢堂, 東京, 545pp (1975).
119. Sastroutomo. S.S. et al.: Ecological studies of waterhyacinth with special emphasis on their growth. Jap. J. Ecol. 28, 191-197 (1978).
120. 澤野稔：クリ樹の凍害防止に関する基礎研究, 博士論文, 17-28 (1975).
121. Scarsbrook, E. and D.E. Davis: Effect of sewage effluent on growth of five vascular aquatic species. Hyacinth Control J. 9, 26-30 (1971).
122. Sculthorpe, C.D.: The biology of aquatic vascular plants. Edward Arnold, London, 640pp (1967).
123. Seed, M.T. and M.Obeid: Sexual reproduction of Eichhornia crassipes (Mart.) Solms in the Nile. Weed Res. 15, 7-12 (1975).
124. 生態学実習懇談会編：Ⅱ. 生態学的諸現象の理解, 生態学実習書, 朝倉書店 141-167 (1967).
125. Sharma, A.: Eradication and utilization of waterhyacinth. Current Science 40(3), 51-55 (1971).
126. 芝山秀次郎 宮原益次：ホテイアオイの種子繁殖について, 雑草研究23 (別号), 216-218 (1978).
127. 島袋敬一：イネの根における細胞間隙の観察, 沖縄農業 3 (1), 41-46 (1964).
128. Slamet. S. and S. Sukowati: Interaction between light intensities and nutrient concentrations on the growth of water hyacinth (Eichhornia crassipes). In Proc. 3rd Indon. Weed Sci. Bandung, 377-391 (1975).
129. Strafford, G.A. (林孝三訳)：植物の代謝, 新生物学シリーズ (9), 河出書房, 東京 (1973).
130. Sutcliffe, J.: Plants and temperature. The Institute of Biology's Studies in Biology, No.86, Edward Arnold, London (1977).
131. 立花吉茂：水草の生態, 遺伝28 (8), 17-24 (1974).
132. 田口亮平：作物生理学, 養賢堂, 東京 (1962).
133. 高橋英一他：作物栄養学 第Ⅳ章 朝倉書店, 東京 (1972).

134. \_\_\_\_\_: 比較植物栄養学, 養賢堂, 東京, 140 (1974).
135. 高橋達郎・竹山賢治: たばこの加里栄養に関する研究 第1報. 日土肥雑  
22 (3), 206-208 (1952).
136. \_\_\_\_\_・吉田大輪: たばこの加里栄養に関する研究 第1報. 日土肥雑  
22 (4), 288-292 (1952).
137. \_\_\_\_\_・\_\_\_\_\_ : たばこの加里栄養に関する研究 第2報. 日土肥雑  
23 (4), 327 (1953).
138. \_\_\_\_\_ : たばこの硝酸態, アンモニア態窒素の吸収について 第1報. 日土肥雑  
29 (5), 200-204 (1958).
139. Talatala, R.L. and M. Soerjani: Some factors influencing seed production in  
water hyacinth. Philippine Weed Science Bulletin 2(1/2), 33-36 (1975).
140. 田中 明・石塚喜明: 水稻の栄養生理 第3章. 養賢堂, 東京 (1965).
141. 田崎忠良・田口亮平: 植物生理生態学実習, 養賢堂, 東京 (1975).
142. Timmer, C.E. and L.W. Weldon: Evapotranspiration and pollution of water by  
dudhyacinth. Hyacinth Cont. J. 6, 34-37 (1967).
143. Timmer, E.: Today's weed; Waterhyacinth. Weed's Today (Spring) 27 (1973).
144. Timmons, F.L.: Control of aquatic weeds. FAO Inter. Conf. on Weed Control  
(1970).
145. 戸刈義次 山田登 林武編: 作物生理学講座: 水分生理編3, 朝倉書店 (1962).
146. 徳永隆司・古田直子・北喜代志: ホテイアオイによる無機栄養塩類の貯蔵  
第12回下水道研究発表会講演集, 434-436 (1975).
147. \_\_\_\_\_: 水生植物の水質汚濁防止への利用, 用水と廃水 23(2), 127-135 (1981).
148. 富久保男 大森正: ホテイアオイの生態 (2) 種子の発芽, 日本雑草防除 研究会第14回講演要旨  
178-180 (1975).
149. \_\_\_\_\_・岡武三郎・中野幸彦: ホテイアオイの生態 (7) 種子の発芽と環境  
条件, 雑草研究 24 (別号), 121-122 (1979).
150. \_\_\_\_\_・小林正志: ホテイアオイの生態学的研究 第2報. 雑草研究  
26, 111-117 (1981).
151. Ueki, K., M. Ito and Y. Oki: Waterhyacinth and its habitats in Japan. Proc.  
of the 5th APWSS Conf., 424-428 (1975).
152. 植木邦和: 河川, 水路, 池沼に異常発生するホテイアオイの生態とその対策に関する研究, 農林水産特別  
研究費補助金による研究報告書, 57pp (1977).

153. Ueki, K. and Y. Oki: Seed production and germination of Eichhornia crassipes in Japan. Proc. of the 7th APWSS Conf.; 257-260 (1979).
154. 歌崎秀夫, ホテイアオイを用いた水質浄化, 公害と対策17 (2), 110-114 (1981)
155. Weert, R.V.D. and G.E. Kamerling: Evapotranspiration of waterhyacinth. J. Hydrology 22, 201-212 (1974).
156. Weldon, L.W. et al.: Common aquatic weeds. Dover Publications INC., New York, 1-3 (1968).
157. Westlake, D.F.: Comparison of plant productivity. Biol. Rev. 38, 385-425 (1963).
158. Wolverton, B.C. and R.C. McDonald: Nutritional composition of waterhyacinths grown on domestic sewage. Economic Botany 32(4), 363-370 (1978).
159. \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_: The water hyacinth: from prolific pest to potential provider. AMBIO 8(1), 2-9 (1979).
160. \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_: Waterhyacinth productivity and harvesting studies. Economic Botany 33(1), 1-10 (1979).
161. Wooten, J.W. and J.D. Dodd: Growth of water hyacinth in treated sewage effluent. Economic Botany 30, 29-37 (1976).
162. Yount, J.L. and R.A. Crossman, Jr.: Eutrophication control by plant harvesting. J. Water Pollution Control Fed. 42, 173-183 (1970).

## Summary

There are reliable estimates of the total acreage now covered by aquatic weeds. Invasions of aquatic weeds into many water systems have created a considerable problem today as waters have been enriched with various wastes from agricultural fields, residences and industries, in recent years.

Waterhyacinth (Eichhornia crassipes (Mart.) Solms) has been listed as one of the 10 most troublesome weeds of the world. It causes a variety of problems for water management; therefore, various measures have been taken to control this weed. These measures, however, are not satisfactory due to the poor physiological and ecological knowledge of its growth and reproduction.

This research was done to clarify the effect of environmental factors on the growth and reproduction of waterhyacinth in an attempt to establish an appropriate waterhyacinth management system.

### 1. Effect of the nutrients in water on the growth and reproduction

The effect of nutrients in the culture solution on the growth and reproduction of this weed was examined.

(1) Plants cultured in solutions deficient in nitrogen, phosphorus or calcium showed poor growth and reproduction. Chemical analysis revealed that the phosphorus content of the tops was low when the solution was deficient in either one of these nutrients.

(2) The growth of adult plants increased with increasing concentration



of ammonium in the culture solution from 0 to 160 ppm. In young plants, however, the maximum growth was observed in the solution of 40 ppm ammonium. The production of new plants was also maximum in the 40 ppm. These results indicate that the optimum growth differs from the optimum reproduction in the nitrogen requirements.

(3) The maximum growth of adult plants was observed in the solution at pH 7.0, and adults plants grew well at a pH within the range of 5.0 to 8.0 in the 20 ppm ammonium solution, but only at pH 7.0 when grown in 160 ppm concentration.

(4) The effect of nitrogen supplied as ammonium salt and nitrate on the growth was investigated. Ammonium salt, nitrate or ammonium nitrate was given in the culture solution. The growth in the solutions containing ammonium salt or ammonium nitrate was optimum at the neutral or slightly basic pH, whereas the growth in the solutions containing nitrate as the sole nitrogen was better in acidic pH than in a neutral or slightly basic pH.

(5) The effect of various concentrations of phosphorus and calcium on the growth and reproduction was investigated. Plants grew well in the solutions with a phosphorus concentration higher than 20 ppm. As the phosphorus concentration were increased from 0 to 40 ppm in the culture solution, the phosphorus content of the tops increased.

(6) The minimum threshold of calcium oxide with which normal growth was obtained was 5 ppm. Even when the calcium oxide concentrations in water were increased above this concentration, calcium content of tops was not increased.

## 2. Effect of temperature on the growth and reproduction

The effect of temperature (15 °C, 20 °C, 25 °C and 30 °C) on the growth and reproduction of both seedling and adult plants was examined.

(1) The percent of seed germination was high even at 15 °C, but was further increased at a higher temperature.

(2) Though the growth of the seedling was greatly affected by the temperature during the first two weeks after germination, the growth of the plants kept at 25 °C and 30 °C was not so different when examined after the fourth week after germination. The growth of the seedling was more rapid under emerged conditions than under submerged conditions.

At 30 °C, the growth of the new plants produced from the mother plants was extremely vigorous, while the mother plants produced more new plants at 20 °C than at 30 °C.

The period of inflorescence formation was earlier and the number of inflorescences was greater at a high temperature than at a low temperature. There was a close relationship between the number of inflorescences and that of new plants produced at both 30 °C and 20 C.

(3) Mother plants at the adult stage produced more new plants at a low temperature than at a high temperature though the growth of the new plants was inhibited at a low temperature, which was a phenomenon similar to that observed in the seedling plants.

Increase in dry matter weight was significantly affected

by temperature, the maximum increase was observed between 25 °C and 30 °C. Adult plants produced more inflorescences at a higher temperature, which suggested that the formation of inflorescences was controlled by accumulated temperature.

(4) The northern boundary of occurrence is the zone with an average atmospheric temperature in January of 1°C, the average annual atmospheric temperature of 13°C, and with the average monthly minimum temperature of -3°C.

(5) The response of waterhyacinth to low temperature under field condition was investigated.

The plants could not survive when the tops of the plants were exposed to subfreezing air temperature even when the water temperature was above freezing.

Percent survival of plants was not related to the duration of the total exposure to below 0°C water temperature because of hardening effects; and, the percent survival of large plants differed from that of small plants.

Terminal buds were easily injured by freezing, but the plants were often seen to recover by developing lateral buds. The percent of terminal buds killed was increased exponentially with increasing time of exposure to low temperature of the leaves and the water (-1°C to 1°C).

### 3. Productivity and dynamics of waterhyacinth population in natural river and lake

The purpose of this research was to determine the dynamics of waterhyacinth population by harvesting and seasonal change.

- (1) The relative growth rate ( $\overline{RGR}$ ) on the number of plants grown under the potential growth condition ranged from 0.08/day to 0.33/day, and seasonal change of  $\overline{RGR}$  was in good agreement with the average air temperature.
- (2) The highest  $\overline{RGR}$  and the shortest doubling time on a fresh weight basis were found at the beginning of the study when space was plentiful. The average  $\overline{RGR}$  was maintained in the range of 0.05–0.06/day by harvesting thereafter. In a natural unharvested population the plants appeared to be naturally thinned out after their growing area was packed completely.
- (3) In a periodically harvested population, the plant height frequency histograms showed a much narrower range both in the early and in the late developmental phase of the population, while in the middle phase it showed the normal distribution due to harvesting. On the contrary, the skewed distribution indicated in the middle phase of the natural unharvested population.
- (4) In the natural unharvested population, the waterhyacinth population in the standing crop on a fresh weight basis showed nearly exponential growth till the standing crop reached 20–25 kg F.W./m<sup>2</sup>. Then, the  $\overline{RGR}$  decreased gradually with the progress of time so that the growth fitted well to a logistic curve. A biomass of 2.67–2.79 kg F.W./m<sup>2</sup> could be harvested throughout investigation.

(5) In the periodically harvested population, the content of nitrogen in the dried matter of the waterhyacinth from two locations was 3.06-3.57% and that of phosphorus was 0.505-0.696%. Generally, young plants had a significantly higher content of nitrogen and phosphorus.

(6) Waterhyacinth growth was investigated in three irrigation systems with different nutrient loading rates. The greatest production of waterhyacinth occurred in the lightly nutrient loaded irrigation, but not in the irrigation with the high nutrient content. No significant difference in nitrogen content of the tops of the plants was detected between the three irrigation systems, whereas the nitrogen content of the roots varied significantly. Also, plants grown in the irrigation system with a higher concentration of phosphorus had tops and roots having a higher phosphorus content. The maximum accumulation of nitrogen and phosphorus by waterhyacinths was observed in the lightly nutrient loaded irrigation; therefore, the increase in accumulation of nitrogen and phosphorus by waterhyacinth appeared to be closely related to the increase in standing crop.

#### 4. Adaptation of waterhyacinth grown under various habitats

Experiments were conducted to study the growth characteristics, seed production and seed germination of waterhyacinth grown under floating, emerged and upland conditions.

(1) The maximum growth occurred under the emerged condition both in summer and in winter. The bound water in the emerged plants was also higher than in the other conditions. Waterhyacinth was found to be

capable of growth even as a terrestrial plant on upland soil, while total leaf area of plant under upland conditions was decreased.

(2) Percent survival of waterhyacinth kept dry for several days in a chamber 20°C was higher for the plants grown under the upland conditions than those grown under the other conditions because cell sap concentration was high and desiccation resistance was kept low under the former condition.

(3) Studies were pursued to compare the anatomical structures of the vegetative tissues of waterhyacinth grown under different conditions.

In the root, the cell walls of both the outer and inner cortex of the upland type changed thick compared with the floating type, and the mechanical tissue of the leaf and petiole of the upland type was well developed. In the root of the emerged type, the aerenchymatic tissue between the outer and inner cortex was sometimes well developed.

(4) There were more stomata on the upper side of the leaf than the lower side, and stomata index varied from part to part in a leaf under all conditions examined. The number of stomata, however, varied significantly depending on the growing conditions.

(5) Plants grown under emerged conditions produced significantly more inflorescences and flowers per inflorescences than those grown in the other conditions comparatively. In fruit setting, however, there was no significant overall difference between the conditions under both natural and artificial pollination.

The germination of the pollen grains and pollen tube growth occurred well at 30 °C and capsules were formed when the temperature was above 20°C.

(6) Maximum seed germination was attained the temperature was between 25 °C and 30 °C. Conc. sulphuric acid treatment and freezing treatment were effective in causing the radicle to emerge. On the other hand, though the seeds produced in Kyoto required an after-ripening period of three months under wet condition at a low temperature, or that of four months under a dry condition a high temperature for successful germination, the seeds produced in Okayama did not require a definite after-ripening period.

5. At present, mechanical removal is the most popular method of controlling the waterhyacinth, but it must be done repeatedly, which is expensive and labor-consuming. But from the positive viewpoint, mechanical removal does result in the removal of excess nutrients from water polluted by sewage or industrial wastes, where waterhyacinth grows as a pest.

On the basis of the fundamental information obtained from this research, the most appropriate management system to control this weed is to remove the excess nutrients by harvesting waterhyacinth, and then feed it to livestock, or to make compost or energy as well as to integrate the mechanical, chemical, biological, and ecological control methods for eradication.